

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUÍS GUILHERME MOREIRA DA SILVA

**GERAÇÕES DE PLAGIOCLÁSIO EM ROCHAS ÁCIDAS HIPOHALINAS  
DOS PLATÔS DE PALMAS (PR) E DE SÃO JOAQUIM (SC),  
PROVÍNCIA MAGMÁTICA DO PARANÁ**

CURITIBA

2018

LUÍS GUILHERME MOREIRA DA SILVA

**GERAÇÕES DE PLAGIOCLÁSIO EM ROCHAS ÁCIDAS HIPOHALINAS  
DOS PLATÔS DE PALMAS (PR) E DE SÃO JOAQUIM (SC),  
PROVÍNCIA MAGMÁTICA DO PARANÁ**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, Curso de Bacharelado em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eleonora Maria Gouvêa Vasconcellos

Coorientador: Prof. Dr. Otávio Augusto Boni Licht

CURITIBA

2018

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais pela paciência e compreensão com as madrugadas barulhentas necessárias à finalização desse trabalho, mas, principalmente, pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha vida, pelas dificuldades que superamos e pelas conquistas que comemoramos sempre juntos. Dedico cada pequena e grande vitória a vocês, não há palavras (e nem fardos de Eisenbahn) que expressem a minha gratidão.

Aos meus amigos de UTFPR, de Sherbrooke e, principalmente, de UFPR por tornarem essa caminhada mais leve, apesar das várias pedras no caminho (literalmente). Agradeço em especial às grandes mulheres com as quais tive o prazer de conviver, vocês são minhas fontes pessoais de inspiração e motivos constantes de orgulho, obrigado por todos os bons sentimentos.

Aos meus orientadores, Eleonora Vasconcellos e Otávio Licht, por me receberem de braços abertos desde o momento no qual demonstrei interesse em trabalhar na PMP. Obrigado pelos apontamentos e compreensão, principalmente quando fui abduzido pelos prazos do Mapeamento, do Relatório Geológico e até mesmo do próprio TCC.

À professora Cristina Valle Pinto-Coelho pela amizade e trabalhos que desenvolvemos juntos desde o meu primeiro ano de curso. Posso ter traído os carbonatos, os dentes e os granitoides, mas você sempre será inspiração e sinônimo de competência e profissionalismo para mim.

Ao professor Elvo Fassbinder e aos colegas de PET Geologia UFPR, CEPET UFPR, JOPARPET e SULPET por me proporcionarem as experiências mais enriquecedoras de toda a graduação. Vida longa ao Programa de Educação Tutorial e à luta por uma educação pública e de qualidade para todos os brasileiros!

Ao LAPEM, ao LAMIR e ao CME pela disponibilização de material, equipamentos e pessoal para a realização de trabalhos durante todo o curso, inclusive aqui no TCC. Agradeço em particular o professor Ossama Harara por possibilitar o acesso ao LAPEM nos períodos mais inusitados do semestre e o Leandro Keiji pelas boas risadas durante as sessões de MEV.

## RESUMO

Três gerações de plagioclásio foram caracterizadas em rochas ácidas hipohialinas dos platôs de Palmas (PPA) e de São Joaquim (PSJ) da Província Magmática do Paraná (PMP). Essas rochas são constituídas por microfenocristais de plagioclásio, sanidina, augita e minerais opacos. Na matriz ocorre plagioclásio, sanidina, quartzo, augita, minerais opacos e vidro vulcânico em porcentagens que variam de 45 a 60%, além de micrólitos de plagioclásio e de augita associados. Os microfenocristais de plagioclásio são predominantemente andesina ( $An_{31-67}$ ), têm granulação muito fina a fina, de 0,2 a 0,8 mm, e apresentam texturas relacionadas à evolução em câmara magmática, principalmente cristais reabsorvidos, glomerocristais e zoneamentos químicos. Já a matriz é composta por oligoclásio ( $An_{17-30}$ ), tem granulação muito fina, de 0,06 a 0,15 mm, e apresenta texturas características de resfriamento rápido, como caudas de andorinha e cristais ocos. Os micrólitos são oligoclásio ( $An_{17-20}$ ) de granulação muito fina e hábito acicular, resultados de resfriamento rápido e associados ao vidro vulcânico. Curvas CSD obtidas para os microfenocristais e a matriz indicam tempos de residência médios de 3.000 e 1.000 anos, respectivamente, com máximo em 10.000 anos. As observações morfológicas, texturais e geoquímicas indicam que cada uma das gerações de plagioclásio correspondem a diferentes estágios na evolução do magma parental e refletem processos físico-químicos que ocorreram desde câmaras magmáticas profundas até a sua erupção.

Palavras-Chave: Ácidas do Tipo Palmas. Análise Textural. *Crystal Size Distribution*.

## ABSTRACT

Three plagioclase generations were described in hypohyaline acidic rocks from Palmas (PPA) and São Joaquim (PSJ) plateaus in the Paraná Igneous Province (PIP). These rocks are composed of microphenocrysts of plagioclase, sanidine, augite and opaque minerals. In the groundmass, there is plagioclase, sanidine, quartz, augite, opaque minerals and volcanic glass, which occurs in percentages ranging from 45 to 60% and is associated with plagioclase and augite microlites. The plagioclase microphenocrysts are predominantly fine-grained andesin ( $An_{31-67}$ ; 0.2 - 0.8 mm) and exhibits textures related to the magma chamber dynamics such as reabsorbed crystals, glomerocrysts and chemical zoning. The groundmass is composed of very fine-grained oligoclase ( $An_{17-30}$ ; 0.06 - 0.15 mm) and features textures related to undercooling like swallow tails and hollow crystals. The microlites are very fine-grained acicular oligoclase ( $An_{17-20}$ ), which also have been formed by undercooling and now occurs associated with volcanic glass. CSD curves obtained for plagioclase microphenocrysts and groundmass indicate mean residence times of 3,000 and 1,000 years, respectively, with maximum at 10,000 years. The morphological, textural and geochemical analysis of these three plagioclase generations indicates that each one corresponds to different stages in the evolution of the parental melt and reflects physico-chemical processes that occur since the deep magmatic chambers until the eruption.

Keywords: Palmas Type Acid Volcanics. Textural Analysis. Crystal Size Distribution.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> - Localização e vias de acesso ao Platô de Palmas .....	11
<b>Figura 1.2</b> - Localização e vias de acesso ao Platô de São Joaquim .....	11
<b>Figura 2.1</b> - Fluxograma esquemático das etapas de trabalho .....	13
<b>Figura 2.2</b> - Obtenção do teor de anortita ao microscópio óptico .....	15
<b>Figura 2.3</b> - Comparação esquemática entre a microscopia óptica e o MEV .....	16
<b>Figura 2.4</b> - Composição de um sistema de EDS .....	17
<b>Figura 2.5</b> - Geração de raios X com feixe de elétrons .....	17
<b>Figura 2.6</b> - Sistema de CL e exemplos de resultados .....	18
<b>Figura 2.7</b> - Fluxograma esquemático da execução da técnica de CSD .....	19
<b>Figura 3.1</b> - Mapa geológico da Província Magmática do Paraná-Etendeka .....	21
<b>Figura 4.1</b> - Fotomicrografias da textura geral das rochas hipohialinas do PPA .....	22
<b>Figura 4.2</b> - Fotomicrografias da textura geral das rochas hipohialinas do PSJ .....	24
<b>Figura 4.3</b> - Exemplos de microtexturas em feldspatos .....	24
<b>Figura 4.4</b> - Fotomicrografias de texturas em microfenocristais de andesina .....	25
<b>Figura 4.5</b> - Fotomicrografias de texturas em microfenocristais de andesina .....	26
<b>Figura 4.6</b> - Fotomicrografias de texturas em microfenocristais de andesina .....	27
<b>Figura 4.7</b> - Fotomicrografias de texturas em oligoclásio da matriz .....	28
<b>Figura 4.8</b> - Fotomicrografias de micrólitos de plagioclásio .....	29
<b>Figura 4.9</b> - Fotomicrografias de texturas em sanidina .....	30
<b>Figura 4.10</b> - Fotomicrografias das fases de quartzo .....	31
<b>Figura 4.11</b> - Fotomicrografias das fases de augita .....	32
<b>Figura 4.12</b> - Fotomicrografias das fases de minerais opacos .....	33
<b>Figura 4.13</b> - Fotomicrografias de quebras perlíticas .....	34
<b>Figura 4.14</b> - Fotomicrografias de esferulitos .....	35
<b>Figura 4.15</b> - Fotomicrografias de processos de alteração da matriz vítreia .....	35
<b>Figura 4.16</b> - Fotomicrografias de estruturas indicativas de fluxo .....	36
<b>Figura 4.17</b> - Fotomicrografias de estruturas bandadas e vênulas/veios .....	37
<b>Figura 4.18</b> - Fotomicrografias de plagioclásios à CL .....	39
<b>Figura 4.19</b> - Fotomicrografias da matriz vítreia e de amígdalas à CL .....	40
<b>Figura 4.20</b> - Curvas CSD para as amostras do PPA e do PSJ .....	41
<b>Figura 4.21</b> - Diagramas ternários An-Ab-Or para as gerações de plagioclásio .....	44
<b>Figura 4.22</b> - Fotomicrografias de microfenocristais de plagioclásio ao EDS .....	45

<b>Figura 4.23</b> - Fotomicrografias de plagioclásios da matriz ao EDS .....	45
<b>Figura 5.1</b> - Texturas em plagioclásio e seus indicativos petrogenéticos .....	47
<b>Figura 5.2</b> - Processos magmáticos e texturas resultantes .....	48
<b>Figura 5.3</b> - Sistema de alimentação dos derrames ácidos da PMP .....	50

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.1</b> - Trabalhos com o plagioclásio como indicador petrogenético.....	9
<b>Tabela 2.1</b> - Relação de amostras, litofácies e métodos .....	14
<b>Tabela 4.1</b> - Compilação das observações petrográficas .....	23
<b>Tabela 4.2</b> - Compilação das observações à CL .....	38
<b>Tabela 4.3</b> - Cálculo do tempo de residência.....	42
<b>Tabela 4.4</b> - Espécies e fórmulas estruturais das gerações de plagioclásio .....	43
<b>Tabela 4.5</b> - Composição dos microfenocristais de plagioclásio por litofácies.....	44
<b>Tabela 4.6</b> - Composição dos plagioclásios da matriz por litofácies.....	46

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1	LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO .....	10
1.2	OBJETIVOS .....	12
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
2.1	ANÁLISE PETROGRÁFICA .....	14
2.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	16
2.2.1	Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS) .....	17
2.2.2	Catodoluminescência (CL) .....	18
2.3	CRYSTAL SIZE DISTRIBUTION (CSD).....	18
<b>3</b>	<b>CONTEXTO GEOLÓGICO.....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>22</b>
4.1	ANÁLISE PETROGRÁFICA MICROSCÓPICA .....	22
4.1.1	Assembleias e Texturas Minerais .....	24
4.1.1.1	Plagioclásio .....	25
4.1.1.2	Sanidina.....	29
4.1.1.3	Quartzo.....	30
4.1.1.4	Augita .....	31
4.1.1.5	Minerais Opacos.....	32
4.1.2	FEIÇÕES DE DESVITRIFICAÇÃO .....	33
4.1.3	FEIÇÕES ESTRUTURAIS.....	35
3.1	CATODOLUMINESCÊNCIA MONOCROMÁTICA .....	37
3.2	CRYSTAL SIZE DISTRIBUTION (CSD).....	40
3.3	QUÍMICA MINERAL SEMIQUANTITATIVA.....	43
<b>5</b>	<b>DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>52</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>58</b>
	APÊNDICE 1 - TABELAS DE COORDENADAS DOS PONTOS DESCritos .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas magmáticos são tipicamente muito complexos e compreendem uma série de processos evolutivos nos quais as frações sólidas, líquidas e gasosas coexistem, interagem e se modificam gradualmente, sobretudo em termos composticionais e texturais (Wernick, 2004; Jerram & Martin, 2008; Gill, 2014). Portanto, processos originais (relacionados à câmara magmática e/ou à intrusão/erupção) e/ou modificadores (sin-, tardí- e/ou pós-magmáticos) são passíveis de identificação com o emprego das técnicas analíticas adequadas, principalmente sobre as fases minerais, cujos resultados corroboram a compreensão da evolução espacial, temporal e composicional dessas rochas (McPhie *et al.*, 1993).

Trabalhos do gênero em unidades efusivas ácidas têm optado pelo estudo de plagioclásios devido à sua relativa abundância nessas rochas, ao amplo intervalo de estabilidade no magma e à baixa taxa de difusão atômica que permite a preservação de zoneamentos químicos, os quais registram, entre outros parâmetros, variações de temperatura, pressão e composição do líquido magmático (Ustunisik *et al.*, 2014; Shane, 2015). Deste modo, inúmeros autores interpretam, a partir da análise morfológica, textural e/ou geoquímica de plagioclásios, processos evolutivos relacionados à gênese de sequências vulcânicas em todo o planeta (Tabela 1.1).

**Tabela 1.1** - Exemplos de trabalhos com o plagioclásio como indicador petrogenético.

TRABALHO	ÁREA DE ESTUDO	TIPO DE ANÁLISE
Higgins (1996)	Vulcão Kameni (Grécia)	Morfológica
Santo (2005)	Vulcão Santorini (Grécia)	Textural e Geoquímica (Elementar)
Andrews <i>et al.</i> (2008)	El Chichón (México)	Geoquímica (Elementar e Isotópica)
Borges <i>et al.</i> (2014)	Província do Deccan (Índia)	Textural e Geoquímica (Isotópica)
Cao <i>et al.</i> (2014)	Depósito de Baogutu (China)	Geoquímica (Elementar e Isotópica)
Renjith (2014)	Barren Island (Índia)	Textural e Geoquímica (Elementar)
Shane (2015)	Vulcão Okataina (NZ)	Textural e Geoquímica (Elementar)
Coote & Shane (2016)	Vulcão Ngauruhoe (NZ)	Textural e Geoquímica (Elementar)
Viccaro <i>et al.</i> (2016)	Monte Etna (Itália)	Textural e Geoquímica (Elementar)
Sano & Toramaru (2017)	Shirataki (Japão)	Morfológica e Textural

Na Província Magmática do Paraná (PMP), especialmente nas unidades ácidas, trabalhos semelhantes foram realizados por Freitas (2009) com as Ácidas do Tipo Chapecó (ATC) da região de Piraju e Ourinhos, em São Paulo (SP), e por Polo

(2014) e Simões (2018) com as Ácidas do Tipo Palmas (ATP) das regiões centro oriental e nordeste do Rio Grande do Sul (RS), respectivamente. Já em uma perspectiva regional, Luchetti (2015) e Vieira (2017) conduzem análises comparativas entre as principais fases minerais das rochas ATC e ATP como subsídio a uma discussão geral sobre a evolução das unidades ácidas no contexto da PMP. Apesar da análise morfológica, textural e/ou geoquímica de plagioclásios não constituir o escopo principal dessas pesquisas, sua abordagem foi de grande valia a muitas das interpretações petrogenéticas. Por fim, Janasi *et al.* (2010) e Angelini (2018) dão protagonismo aos plagioclásios, o primeiro em uma comparação entre as fases fenocristal e matriz de dacitos ATC e ATP e o segundo em uma caracterização textural e geoquímica (elementar e isotópica) de fenocristais em traquidacitos ATC da região de Guarapuava, no Paraná (PR).

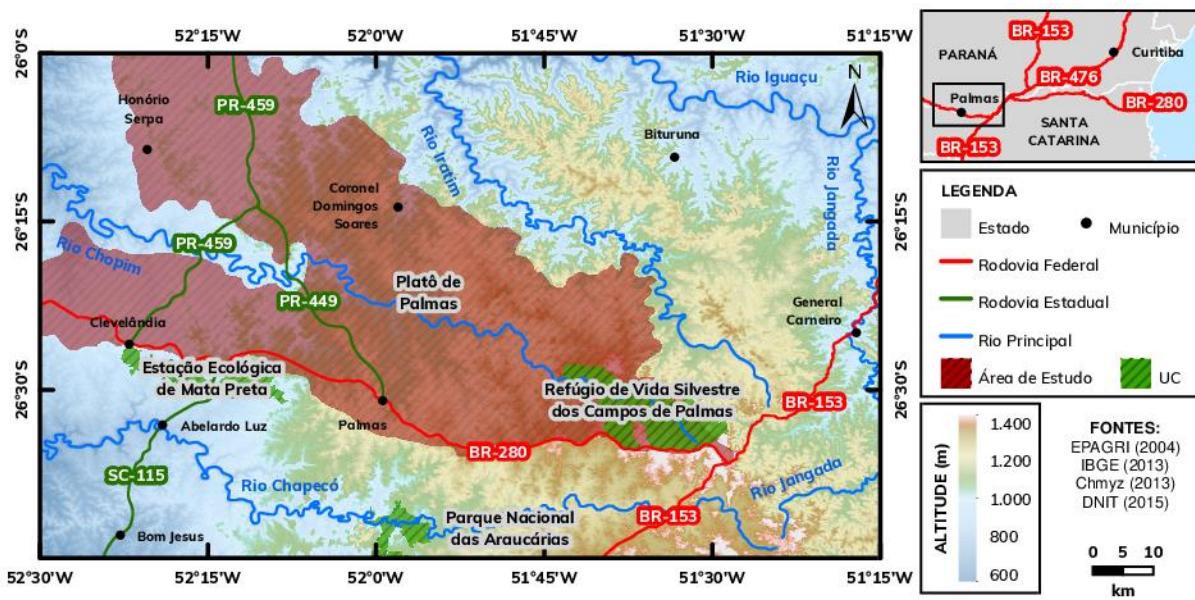
Em grande parte desses e outros trabalhos que discutem a petrografia das unidades ácidas da PMP, particularmente nos que tratam das ATP, são descritas pelo menos três fases de plagioclásio: microfenocristal, matriz e micrólito. A estes se integram o mapeamento de Arioli & Licht (2013) e as pesquisas de Chmyz (2013) e Besser (2017), estas as quais focam na investigação da gênese efusiva e/ou vulcanoclástica do substrato dos platôs de Palmas (PPA), no PR, e de São Joaquim (PSJ), em Santa Catarina (SC), respectivamente. Deste modo, o refinamento da petrografia somado à utilização de técnicas analíticas complementares pode contribuir à compreensão do significado dessas fases minerais e da evolução e colocação dessas sequências no contexto da PMP, constituindo, assim, o escopo deste trabalho.

## 1.1 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

De forma a conduzir uma análise comparativa dos resultados, selecionaram-se duas áreas de estudo geograficamente distantes, mas com evolução e contexto geológicos muito semelhantes: o PPA, na região Centro Sul Paranaense, e o PSJ, na região Serrana do estado de SC.

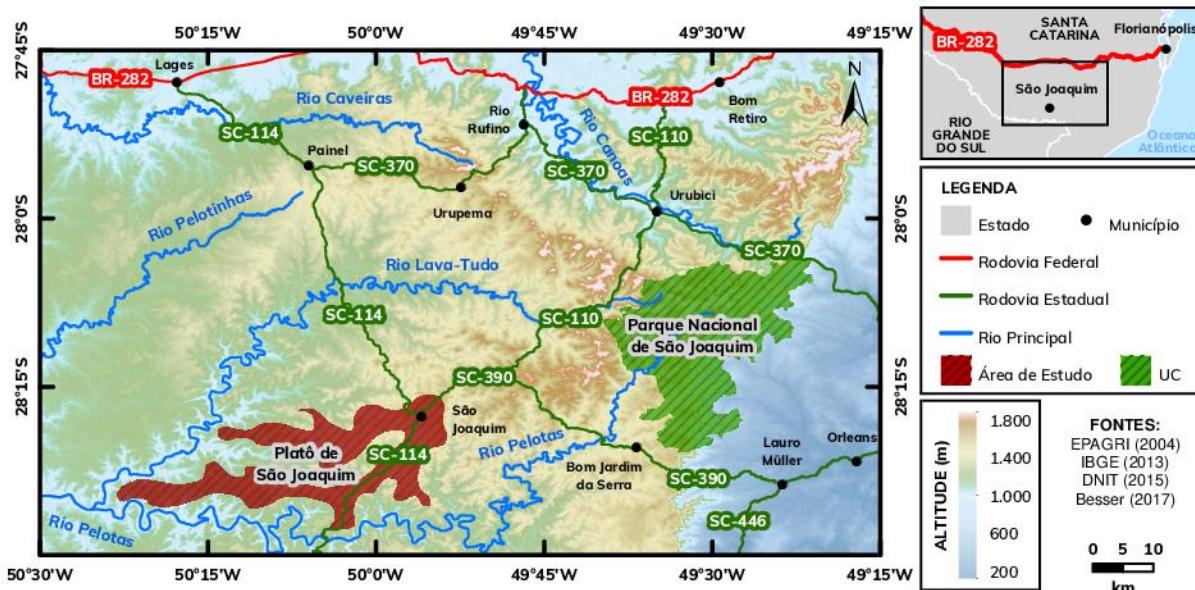
O PPA ocorre nas proximidades da cidade homônima, distando cerca de 380 km de Curitiba. A partir da capital paranaense, segue-se pela BR-476 até União da Vitória, pela BR-153 até General Carneiro, a partir da onde, por fim, a BR-280 dá acesso à área (Figura 1.1). A PR-449 constitui uma via de acesso alternativa pelo

sudoeste paranaense.



**Figura 1.1** - Localização e vias de acesso ao Platô de Palmas (PPA), região Centro-Sul do estado do Paraná.

O PSJ ocorre nas adjacências da cidade homônima, distando cerca de 250 km de Florianópolis. A partir da capital catarinense, segue-se pela BR-282 até Bom Retiro, a partir de onde a SC-110 dá acesso à área (Figura 1.2). A SC-114 e a SC-390 constituem vias de acesso alternativas pelas regiões de Lages e de Criciúma, respectivamente.



**Figura 1.2** - Localização e vias de acesso ao Platô de São Joaquim (PSJ), região Serrana do estado de Santa Catarina.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a caracterização textural e geoquímica das diferentes gerações de plagioclásio das rochas ácidas hipohialinas que compõem os platôs de Palmas (PR) e de São Joaquim (SC), de modo a contribuir com o entendimento da evolução e colocação dessas unidades no contexto da PMP. Para tanto, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e tipificar as gerações de plagioclásio sob o microscópio óptico;
- Determinar as composições semiquantitativas das gerações de plagioclásio com o auxílio da Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS) acoplada ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV);
- Observar texturas, variações compostionais e inferir elementos ativadores e/ou defeitos estruturais das gerações de plagioclásio por meio da Catodoluminescência (CL) monocromática acoplada ao MEV;
- Calcular tempos de residência e inferir, junto às texturas, modelos de evolução magmática para as gerações de plagioclásio com base em curvas CSD.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foram disponibilizadas 55 lâminas petrográficas dos trabalhos de Chmyz (2013) e de Besser (2017), 39 do primeiro e 16 do segundo, respectivamente. Estas foram submetidas a uma primeira triagem, na qual se selecionaram as amostras de litofácies substancialmente hialinas, ou seja, com alta porcentagem de vidro vulcânico (e, portanto, nas quais ocorre a terceira geração de plagioclásios, os micrólitos). Em um segundo momento, confirmou-se ao microscópio óptico o caráter hipohialino das lâminas petrográficas restantes, de modo que a coleção final é composta por 12 amostras do PPA e 10 amostras do PSJ, cujas coordenadas dos afloramentos onde foram coletadas constam no Apêndice 1.

Este universo de 22 lâminas foi então submetido à análise petrográfica e, a partir desta, algumas delas selecionadas para caracterização textural e geoquímica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para tanto, as amostras foram metalizadas com a deposição superficial de uma fina camada de ouro no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Posteriormente, fotomicrografias ao microscópio óptico e ao MEV foram tratadas e analisadas utilizando-se a técnica de *Crystal Size Distribution* (CSD). A Figura 2.1 apresenta o fluxograma esquemático dessas etapas de trabalho e a Tabela 2.1 a relação de amostras com suas respectivas litofácies e métodos utilizados.

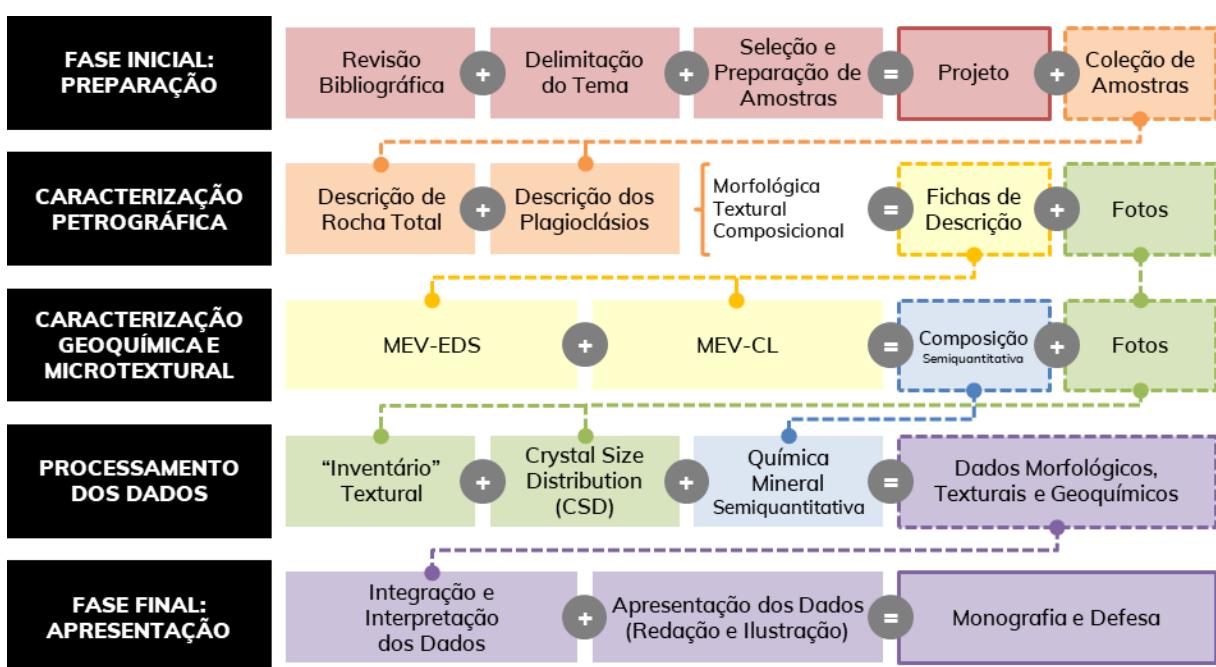


Figura 2.1 - Fluxograma esquemático das etapas de trabalho.

**Tabela 2.1** - Relação de amostras, litofácies e métodos (PET - petrografia; EDS - Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia; CL - Catodoluminescência; CSD - *Crystal Size Distribution*).

AMOSTRA	LITOFAÇIES	PET	EDS	CL	CSD (PET)	CSD (CL)
<b>Platô de Palmas (PPA), PR</b>						
LC-01-6	Riolito Maciço					
LC-11-4	Riolito com Disjunções em Laje					
LC-12-2	<i>Pitchstone</i>					
LC-12-3	<i>Pitchstone</i>					
LC-15-1A	Riolito com Disjunções em Laje					
LC-16-2	Riolito Afanítico					
LC-16-3	Riolito com Disjunções em Laje					
LC-20-6	<i>Pitchstone</i>					
LC-23-1	Riolito Afanítico					
LC-25-1	Riolito Afanítico					
LC-28-1	Riolito com Disjunções em Laje					
LC-29-1	<i>Pitchstone</i>					
		Parcial	12	7	5	5
						3
<b>Platô de São Joaquim (PSJ), SC</b>						
SJ-015-A1	Dacito Maciço					
SJ-032	Dacito Hialino com Geodos					
SJ-054	<i>Pitchstone</i> Maciço					
SJ-055-A	<i>Pitchstone</i> Maciço					
SJ-066	Dacito Litoidal/Vítreo Amigdaloidal					
SJ-083	Dacito Bandado					
SJ-105-A	Dacito Bandado					
SJ-228-A	<i>Pitchstone</i> Maciço					
SJ-250	Dacito Bandado					
SJ-258	<i>Pitchstone</i> Amigdaloidal					
		Parcial	10	7	5	5
		Total	22	14	10	10
						6

## 2.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA

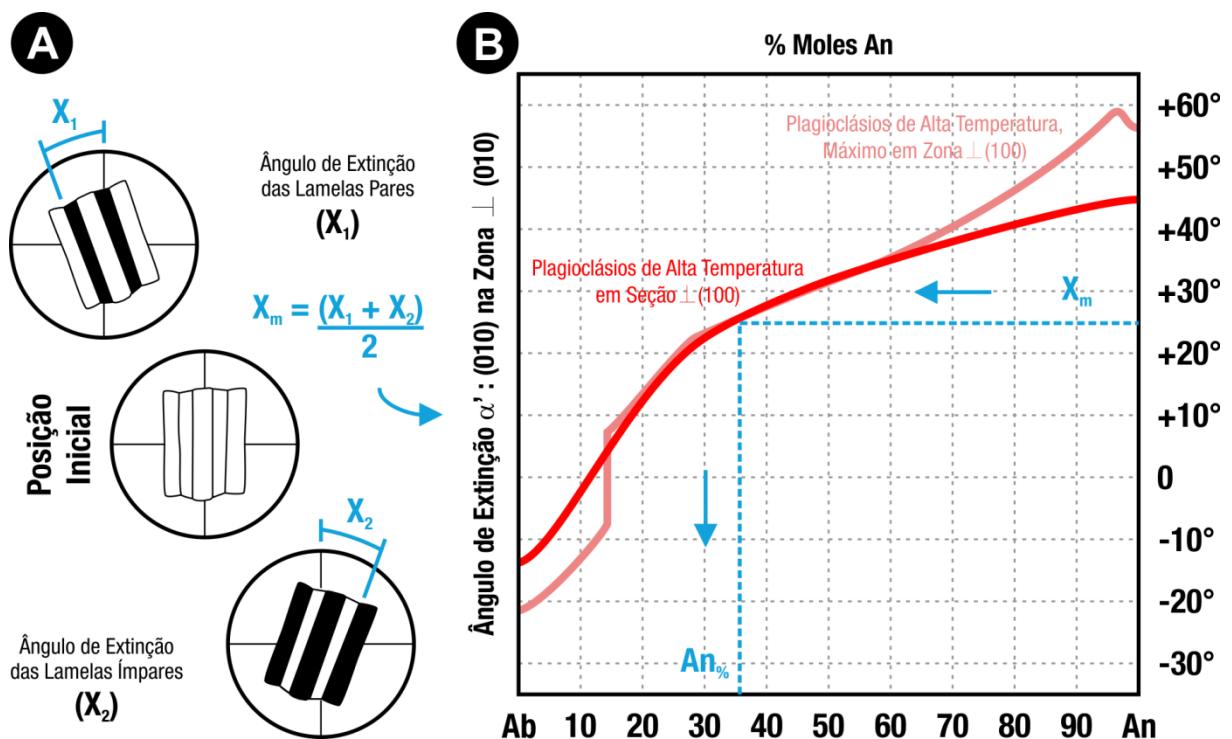
As lâminas petrográficas foram descritas em microscópios ópticos de luz transmitida do modelo Olympus BX-51-P. As fotomicrografias, por sua vez, foram capturadas com câmera acoplada ao microscópio do modelo Leica DFC-295 utilizando o software Leica Application Suite V4. Todos esses recursos estão disponíveis no Laboratório de Pesquisa em Microscopia (LAPEM) do Departamento de Geologia (DEGEOL) da UFPR.

Para tanto, foi elaborada uma ficha de descrição petrográfica adaptada aos objetivos do projeto, de modo que, além das observações microscópicas padrões,

também fossem pormenorizados aspectos morfológicos, texturais e composicionais das gerações de plagioclásio. Um exemplo dessa ficha e as 22 descrições petrográficas que embasam este trabalho estão disponíveis no Apêndice 2.

No exame dos plagioclásios, em particular, foram sucedidas as três abordagens supracitadas: 1) morfológica, a qual consistiu na medição da altura e da largura de 5 espécimes de cada geração; 2) textural, baseada principalmente nas texturas descritas pelos trabalhos relacionados na Tabela 1; 3) composicional, fundamentada no método de Michel-Levy, executado, quando possível, em 5 espécimes de cada geração e descrito a seguir (Vlach, 2002; Deer *et al.*, 1993):

- Seleciona-se um grão geminado segundo a Lei da Albite (ou seja, portador de geminação polissintética simples), posicionando-o com as lamelas paralelas ao fio N-S do retículo da lente ocular do microscópio petrográfico;
- Mede-se o ângulo de extinção das lamelas pares ( $X_1$ ) e ímpares ( $X_2$ ) do grão selecionado, de forma que a diferença entre estes não seja superior a 5°. Em seguida, calcula-se a média aritmética ( $X_m$ ) (Figura 2.2A);
- O maior  $X_m$  encontrado é projetado no diagrama Michel-Levy (Figura 2.2B) e, assim, é obtido o teor de anortita da geração de plagioclásio.

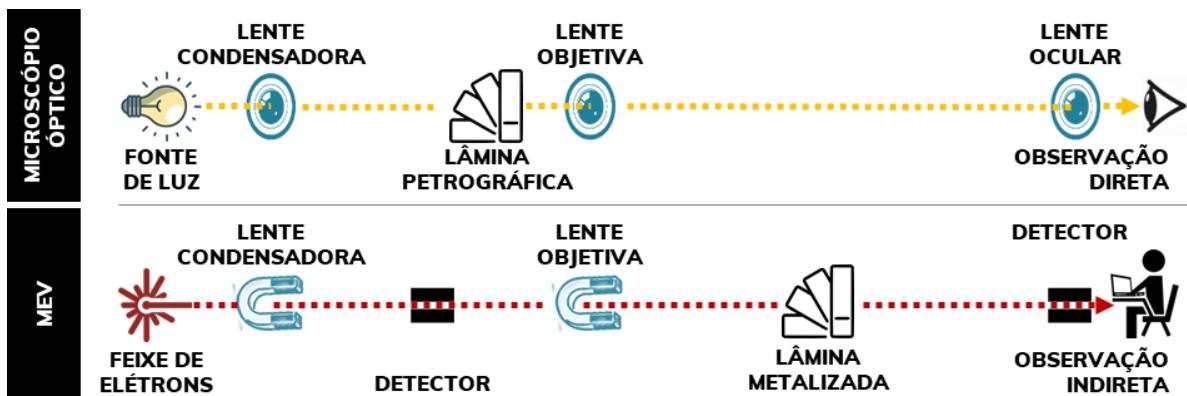


**Figura 2.2** - Obtenção do teor de anortita ao microscópio óptico: A) medição dos ângulos de extinção das lamelas da geminação polissintética; B) diagrama Michel-Levy com as curvas para definição de espécies de plagioclásio de alta temperatura, típicas de rochas vulcânicas. Modificado de Vlach (2002) e Deer *et al.* (1993).

## 2.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O MEV fornece, de forma rápida e precisa, informações sobre a morfologia e a identificação de elementos químicos de amostras sólidas (Dedavid *et al.*, 2007). É uma técnica comum às áreas de Biologia, Odontologia, Farmácia, Engenharia, Química, Metalurgia, Física, Medicina e Geociências. Na Geologia, destacam-se os estudos em Paleontologia (principalmente a caracterização morfológica de microfósseis), Sedimentologia (obtenção de imagens tridimensionais de grãos e intercrescimentos, além da avaliação de textura e porosidade), Mineralogia (observação da morfologia de cristais em microescala) e Petrologia (Reed, 2005).

Ao invés de fôtons, como na microscopia óptica convencional, o MEV utiliza um estreito feixe de elétrons para explorar a superfície da amostra ponto a ponto (Figura 2.3) (Dedavid *et al.*, 2007). O princípio físico é relativamente simples: um filamento de tungstênio é aquecido e gera um feixe de elétrons acelerado pela alta tensão criada entre um ânodo e o próprio filamento. Em seguida, esse feixe é focalizado por uma série de lentes eletromagnéticas e, ao interagir com a amostra, fôtons e elétrons emitidos por esta são detectados e processados pelo computador, o qual retorna com um sinal de vídeo (Silva, 2014).

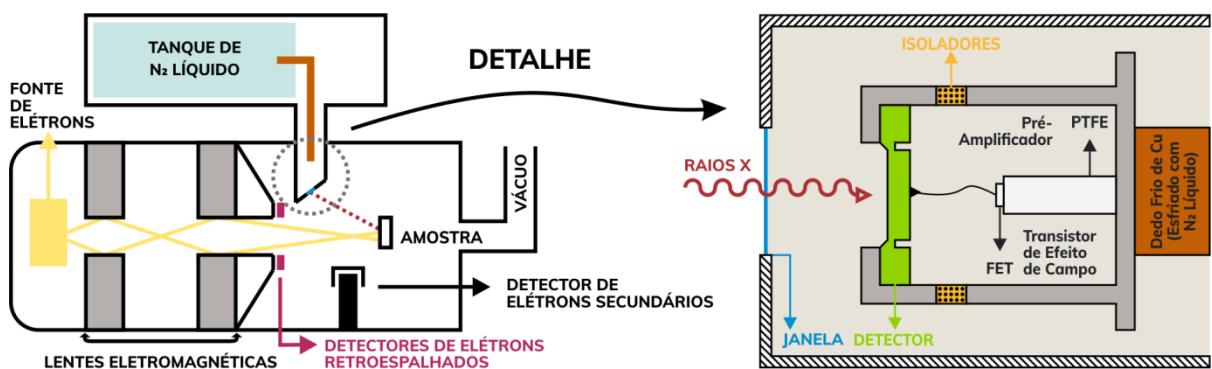


**Figura 2.3** - Comparação esquemática entre a microscopia óptica e o MEV. Modificado de Dedavid *et al.* (2007).

As análises ao MEV foram realizadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) do DEGEOL da UFPR utilizando um equipamento da marca JEOL, modelo 6010LA. Acoplado a este, recorreu-se ao acessório para análise química por Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS) da marca JEOL, modelo EX-94410T1L11, e ao acessório para análise monocromática de Catodoluminescência (CL) da marca Deben, modelo Centaurus Detector.

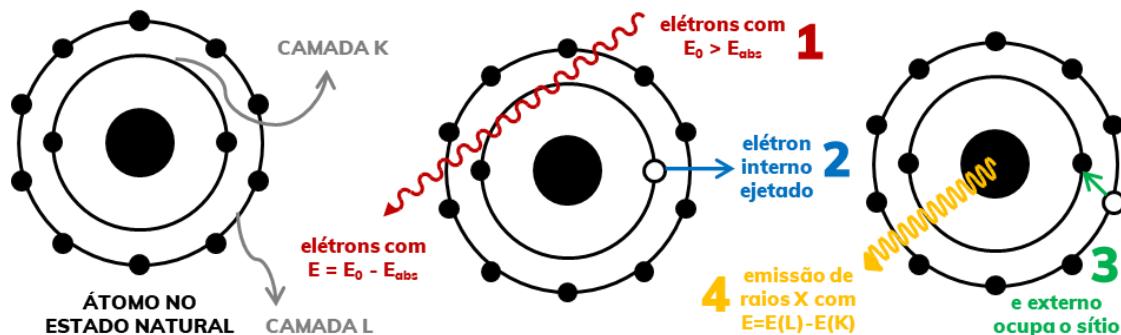
## 2.2.1 Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS)

O EDS consiste na medida de raios X característicos emitidos pela região da amostra bombardeada pelo feixe de elétrons do MEV (Figura 2.4) (Dedavid *et al.*, 2007). Esses raios X característicos estão intrinsecamente relacionados ao número atômico, de forma que, a partir do comprimento de onda e/ou da energia, podem ser utilizados para identificar os elementos químicos responsáveis pela radiação.



**Figura 2.4** - Composição de um sistema de EDS. Modificado de Reed (2005) e Severin (2005).

Os raios X característicos são produzidos pela interação entre o feixe de elétrons do MEV e a eletrosfera dos átomos da amostra (Figura 2.5) (Severin, 2005). Sob condições específicas, esse feixe é capaz de provocar a ejeção de um elétron das camadas interiores de um átomo e, assim, o energiza. O átomo logo retorna a um estado de baixa energia com a transferência de elétrons das camadas exteriores para os sítios livres nas camadas interiores. Nesse momento, um fóton de energia igual à diferença dos níveis de energia entre essas duas camadas é emitido, este, na maioria das vezes, na faixa dos raios X e diagnóstico do elemento químico ali presente.

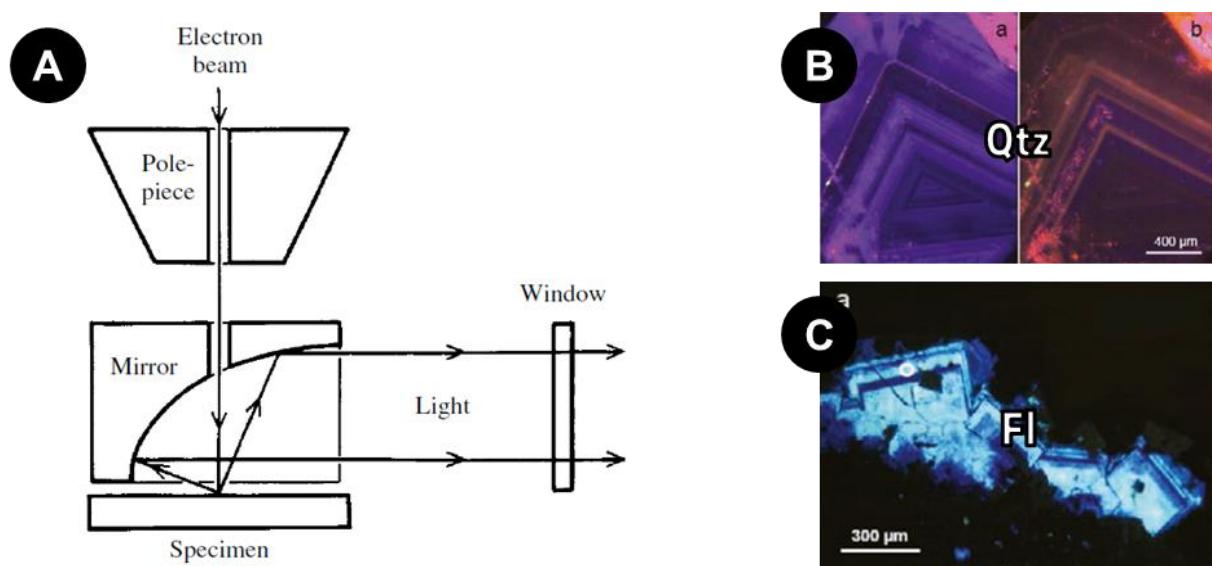


**Figura 2.5** - Geração de raios X com feixe de elétrons. Modificado de Severin (2005).

## 2.2.2 Catodoluminescência (CL)

Assim como o EDS, a CL acoplada ao MEV baseia-se na medição da radiação emitida por uma amostra excitada por um feixe de elétrons (Figura 2.6A). Porém, nessa técnica, são analisadas as emissões na faixa entre o ultravioleta e o infravermelho visível, estas decorrentes de defeitos intracristalinos e/ou de elementos traço ativadores (Pagel *et al.*, 2010).

Nas Geociências, a CL é uma poderosa ferramenta na separação quantitativa de espécies minerais, na diferenciação de gerações de um mineral, na investigação de zoneamentos (Figuras 2.6B e 2.6C), na análise de microestruturas, na observação das relações texturais entre as fases minerais de uma rocha e na constatação da presença de elementos traço (Götze *et al.*, 2010; Higgins, 2017).



**Figura 2.6** - Sistema de CL e exemplos de resultados: A) composição de um sistema de CL; B) CL aplicada a quartzo hidrotermal zonado; C) CL aplicada a fluorita vulcânica zonada. Modificado de Reed (2005) e Gucsik (2009).

## 2.3 CRYSTAL SIZE DISTRIBUTION (CSD)

Inicialmente desenvolvido para atender à demanda de engenheiros químicos por soluções em sistemas particulados (Randolph & Larson, 1971), o CSD foi adaptado à Petrologia Ígnea por Marsh (1988) e hoje é amplamente utilizado no estudo do resfriamento de magmas e dos processos envolvidos no seu armazenamento e transporte em direção à superfície terrestre (Pamucku *et al.*, 2012; Luchetti, 2015; Angelini, 2018).

A técnica de CSD baseia-se na premissa de que a densidade populacional de partículas ( $n$ ) cristalizando a partir de um magma em condições estáveis (isto é, no qual as taxas de nucleação e de crescimento ( $G$ ) são constantes) obedece a uma reta no gráfico  $\ln(n)$  x tamanho da partícula com inclinação/slope ( $S$ ) característico e igual ao inverso do produto de  $G$  pelo tempo de residência ( $\tau$ ) (Equação 1) (Marsh, 1988; Luchetti, 2015). Porém a realidade é que em sistemas magmáticos abertos e, portanto, sujeitos a misturas, assimilações e diferenciações, o que se obtém são curvas que, por regressão linear, são aproximadas de linhas de tendência efetivamente utilizadas no cálculo de  $\tau$ .

$$S = -\frac{1}{G \times \tau} \quad (1)$$

Para tanto, fotomicrografias ao microscópio óptico e à CL foram tratadas de modo a destacar os cristais de plagioclásio e estes, por sua vez, mensurados no *ImageJ* (Rasband, 2010), software de livre acesso para análise de imagens. As medições de tamanho de cristal foram então submetidas a correções estereológicas e as curvas CSD adquiridas no *CSD Corrections 1.60* (Higgins, 2000). Os parâmetros de correção aplicados vão de encontro aos adotados por Angelini (2018) para a forma dos cristais (eixo curto : eixo intermediário : eixo longo = 1,0 : 1,7 : 2,5) e para o fator de esfericidade (0,3 numa escala de 0 a 1, na qual 0 = paralelepípedo e 1 = elipsoide). A Figura 2.7 ilustra o processo de execução do CSD neste trabalho.

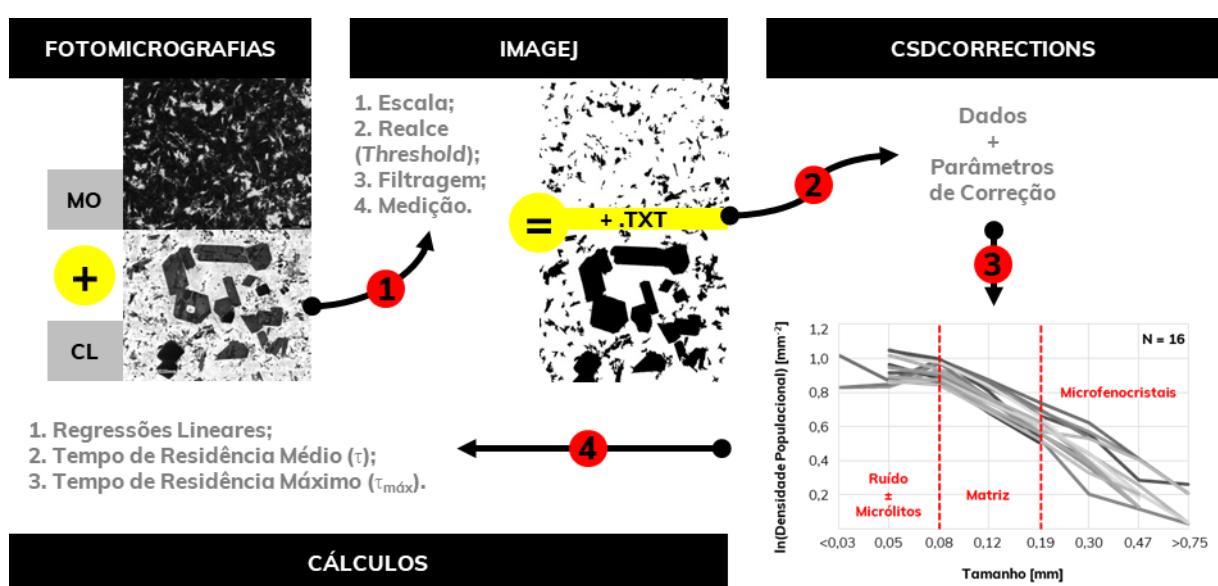


Figura 2.7 - Fluxograma esquemático da execução da técnica de CSD.

### 3 CONTEXTO GEOLÓGICO

A PMP consiste em uma das maiores manifestações vulcânicas intracontinentais do planeta, resultado dos campos tensoriais e processos endógenos que culminaram na desagregação do Gondwana e consequente abertura do Atlântico Sul entre o Jurássico e o Cretáceo (Milani *et al.*, 2007; Misuzaki & Thomaz Filho, 2004). A maior parte do registro desse extenso magmatismo encontra-se em território brasileiro e pode ser observada na forma de rochas extrusivas que recobrem cerca de três quartos da Bacia do Paraná ( $1,2 \times 10^6$  km $^2$ ) (Figura 3.1), além de intrusões rasas, tanto diques como soleiras, encaixadas entre as rochas sedimentares da bacia, seu embasamento e entre os próprios derrames da PMP (Melfi *et al.*, 1988).

Predominam na província os basaltos toleíticos e andesíticos que representam aproximadamente 90% do volume total de rochas vulcânicas, seguidos dos andesitos toleíticos (7%) e, subordinadamente, dos riódacitos e riolitos (3%) (Bellieni *et al.*, 1986; Licht, 2018). Dada a dimensão e a aparente homogeneidade dos litotipos, diversos autores têm empregado técnicas geoquímicas para compartimentar, caracterizar a distribuição e propor uma estratigrafia para as sequências vulcânicas da PMP (Licht & Lima, 2014). Na mais clássica das propostas, Bellieni *et al.* (1984) estabelecem a divisão da província em três setores com base em lineamentos regionais e teores relativos de TiO<sub>2</sub>. Já Peate (1989) e Peate *et al.* (1992) descrevem oito magmas-tipo com base em teores de SiO<sub>2</sub> e TiO<sub>2</sub>, sendo dois deles ácidos. Desse modo, definiu-se: 1) Domínio Meridional, localizado abaixo do lineamento Rio Uruguai, constituído predominantemente por lavas básicas e, subordinadamente, rochas ATP nas porções superiores; 2) Domínio Setentrional, situado acima do lineamento Rio Piquiri, também majoritariamente básico e pontualmente sobreposto por rochas ATC; 3) Domínio Central, posicionado entre os lineamentos Rio Uruguai e Rio Piquiri, o qual apresenta características intermediárias entre as duas anteriores, incluindo a ocorrência dos dois magmas-tipo ácidos. Recentemente, Licht (2018) propõe, com base em gaps nos teores de SiO<sub>2</sub>, Zr, TiO<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 16 magmas-tipo distribuídos em duas subprovíncias (Sul e Centro-Norte), as quais teriam evoluído ora independentes e ora conjugadas em um episódio magmático com diversas fontes e/ou graus de contaminação crustal variáveis.

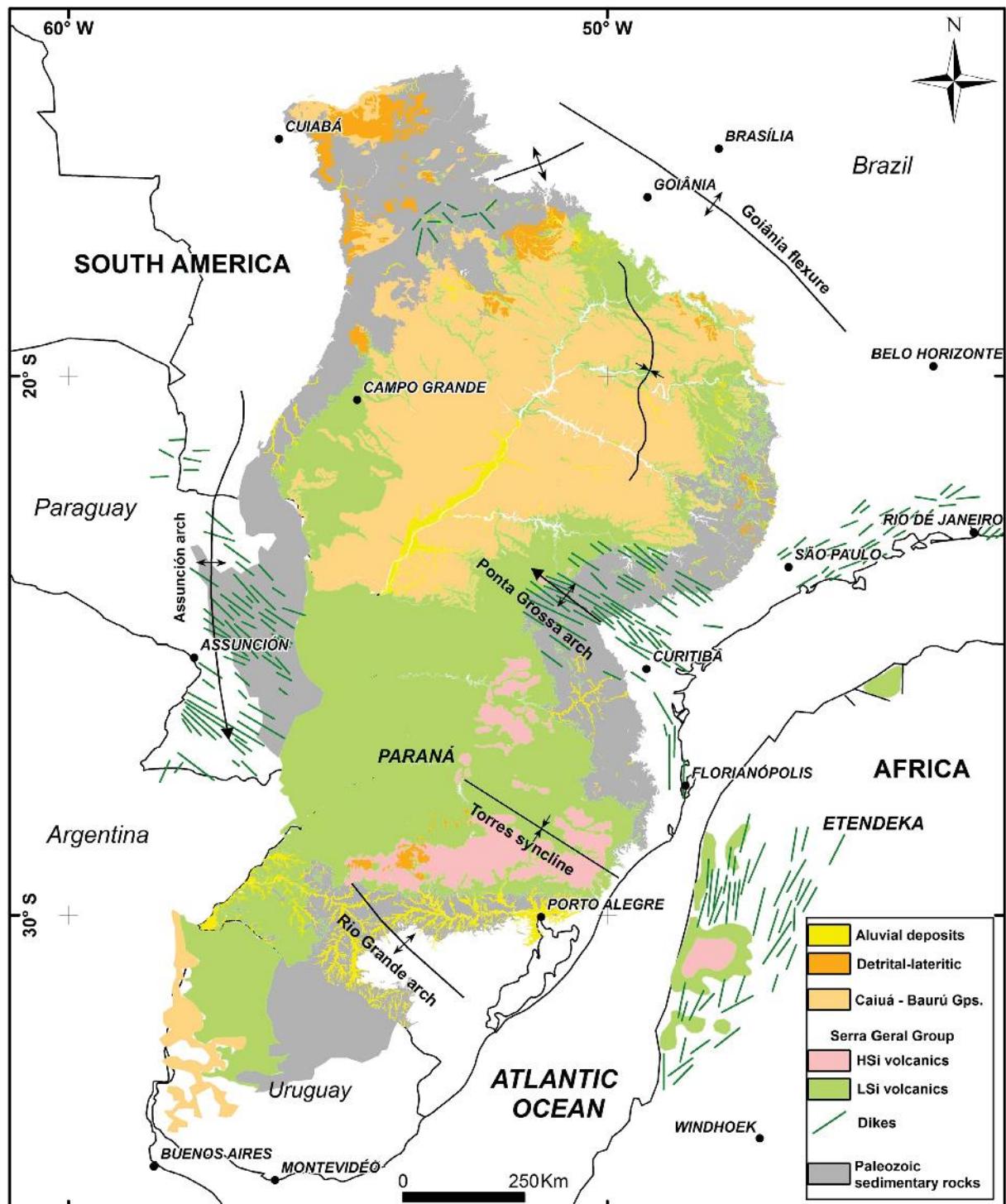


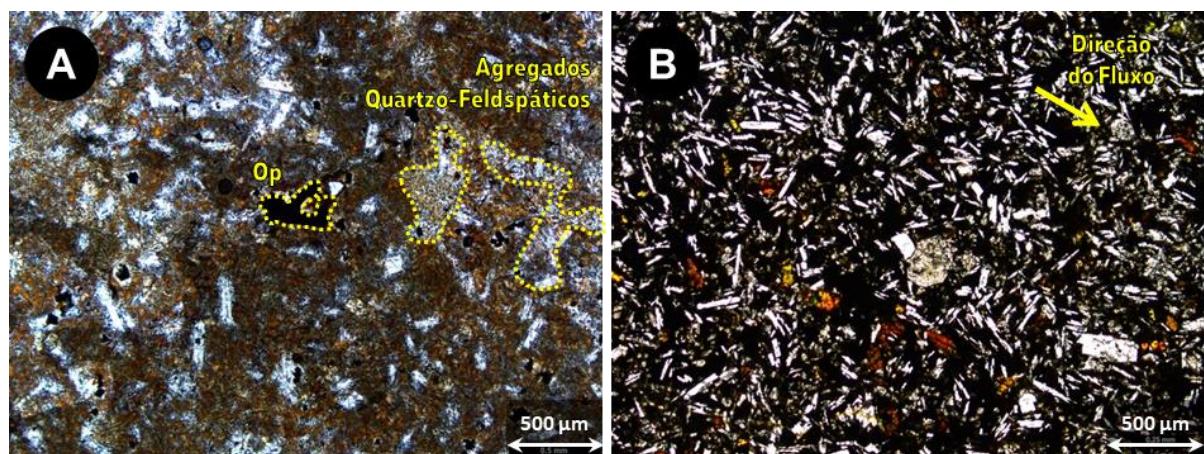
Figura 3.1 - Mapa geológico da Província Magnética do Paraná-Etendeka. Fonte: Licht (2018).

## 4 RESULTADOS

Este capítulo está estruturado de forma a abordar, em um primeiro momento, as principais observações morfológicas e texturais evidenciadas na petrografia, tanto em rocha total como nas gerações de plagioclásio. Em seguida, a abordagem morfológica/textural segue com a CL e o CSD aplicados essencialmente às fases minerais de interesse. Por fim, são apresentados os dados geoquímicos.

### 4.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA MICROSCÓPICA

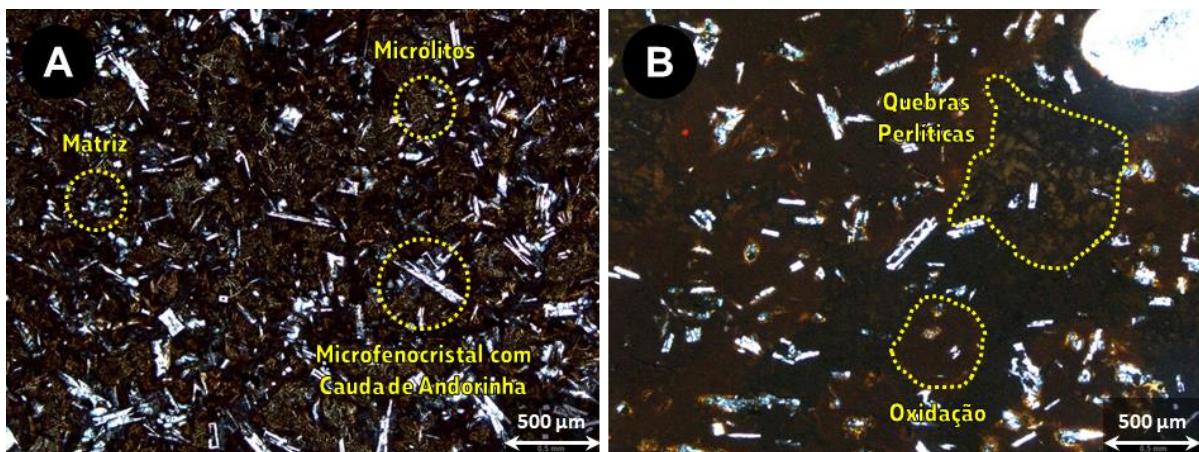
Em geral, tanto as amostras do PPA como as do PSJ são constituídas por microfenocristais de plagioclásio, sanidina e, mais raramente, augita e minerais opacos. A matriz é hipohialina, composta predominantemente por vidro vulcânico em porcentagens que variam de 45 a 60%. Também na matriz ocorrem, subordinadamente, cristais isolados ou agregados de plagioclásio, sanidina, quartzo, augita e minerais opacos. À matriz vítreia associam-se micrólitos de plagioclásio e de augita. Um compilado das observações petrográficas está disponível na Tabela 4.1, enquanto as Figuras 4.1 e 4.2 ilustram a textura geral das rochas de Palmas e de São Joaquim, respectivamente.



**Figura 4.1** - Fotomicrografias da textura geral das rochas hipohialinas do PPA: A) em LC-16-2, da litofácies riolito afanítico, observam-se os microfenocristais feldspáticos destacando-se da matriz vítreia, assim como os agregados quartzo-feldspáticos. Destaque também ao microfenocristal de mineral opaco ao centro com feições de reabsorção (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); B) em LC-29-1, da litofácies *pitchstone*, feldspatos tanto da fase microfenocristal como matriz se destacam do vidro vulcânico opaco. Nota-se também a orientação incipiente a moderada de ambas as fases, sugerindo estrutura de fluxo com a direção indicada (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x).

**Tabela 4.1** - Compilação das observações petrográficas (Fases: PI - plagioclásio; .Sa - sanidina; Qtz - quartzo; Aug - augita; Op - minerais opacos; VV - vidro vulcânico. Gerações: P - microfenocristal (*phenocryst*); G - matriz (*groundmass*); M - micrólito. Estruturas: M - maciça; F - fluidal; B - bandada; A - amigdaloidal; V - com veio(s) e/ou vênula(s)).

PONTO	LITOFAÇIES	FASES								TEXTURA	ESTRUTURAS					
		PI			Sa	Qtz	Aug	Op	VV		M	F	B	A	V	
		P	G	M												
<b>Platô de Palmas (PPA), PR</b>																
LC-01-6	Riolito Maciço	5	5	Tr	15	15	5	5	50	Hipohialina Microporfírica						
LC-11-4	Riolito com Disjunções em Laje	5	5	Tr	15	10	5	5	55							
LC-12-2	<i>Pitchstone</i>	5	5	Tr	20	5	5	5	55							
LC-12-3	<i>Pitchstone</i>	5	5	Tr	15	5	Tr	10	60							
LC-15-1A	Riolito com Disjunções em Laje	~2	~3	Tr	15	10	5	5	60							
LC-16-2	Riolito Afanítico	5	5	Tr	15	10	5	5	55							
LC-16-3	Riolito com Disjunções em Laje	5	5	Tr	15	15	5	5	50							
LC-20-6	<i>Pitchstone</i>	5	5	Tr	20	5	5	5	55							
LC-23-1	Riolito Afanítico															
LC-25-1	Riolito Afanítico	10	Tr	Tr	15	10	5	5	55							
LC-28-1	Riolito com Disjunções em Laje															
LC-29-1	<i>Pitchstone</i>	~3	~7	Tr	15	15	5	Tr	55							
<b>Platô de São Joaquim (PSJ), SC</b>																
SJ-015-A1	Dacito Maciço	5	15	Tr	10	10	5	10	45	Hipohialina Microporfírica						
SJ-032	Dacito Hialino com Geodos	5	10	5	5	5	5	5	60							
SJ-054	<i>Pitchstone</i> Maciço	Tr	15	Tr	5	10	Tr	10	60							
SJ-055-A	<i>Pitchstone</i> Maciço	Tr	10	Tr	5	5	Tr	15	65							
SJ-066	Dacito Litoidal/Vítreo Amigdaloidal	5	10	5	5	5	5	5	60							
SJ-083	Dacito Bandado	10	5	Tr	5	10	5	10	55							
SJ-105-A	Dacito Bandado	5	15	Tr	5	10	5	10	50							
SJ-228-A	<i>Pitchstone</i> Maciço	Tr	20	Tr	5	10	Tr	10	55							
SJ-250	Dacito Bandado	5	10	Tr	10	15	10	5	45							
SJ-258	<i>Pitchstone</i> Amigdaloidal	5	10	Tr	5	10	5	5	60							



**Figura 4.2** - Fotomicrografias da textura geral das rochas hipohialinas do PSJ: A) em SJ-032, da litofácies dacito hialino com geodos, é nítido o contraste em tamanho das fases microfenocristal, matriz e micrólito (estes últimos são os cristais aciculares muito finos disseminados na matriz vítrea). Vale ressaltar também as caudas de andorinha, feição de resfriamento rápido, evidente principalmente nos microfenocristais feldspáticos (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); B) em SJ-258, da litofácies *pitchstone* amigdaloidal, já se observa o predomínio do vidro vulcânico em detrimento às fases cristalinas, além da oxidação pervasiva e a ocorrência pontual de quebras perlíticas (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x).

#### 4.1.1 Assembleias e Texturas Minerais

Na análise petrográfica microscópica, as formas de ocorrência das fases minerais, especialmente as texturas associadas, constituem a base para a interpretação de processos petrogenéticos, assim como a seleção de amostras e a discussão dos resultados de técnicas analíticas subsequentes. Naturalmente, aqui é dado destaque especial às gerações de plagioclásio, de modo a subsidiar futuras discussões acerca de sua origem, evolução e contextualização com a colocação das litofácies hipohialinas das áreas de estudo. Para tanto, a descrição de microtexturas das fases feldspáticas baseou-se principalmente nas observações do trabalho de Renjith (2014) exemplificadas na Figura 4.3.

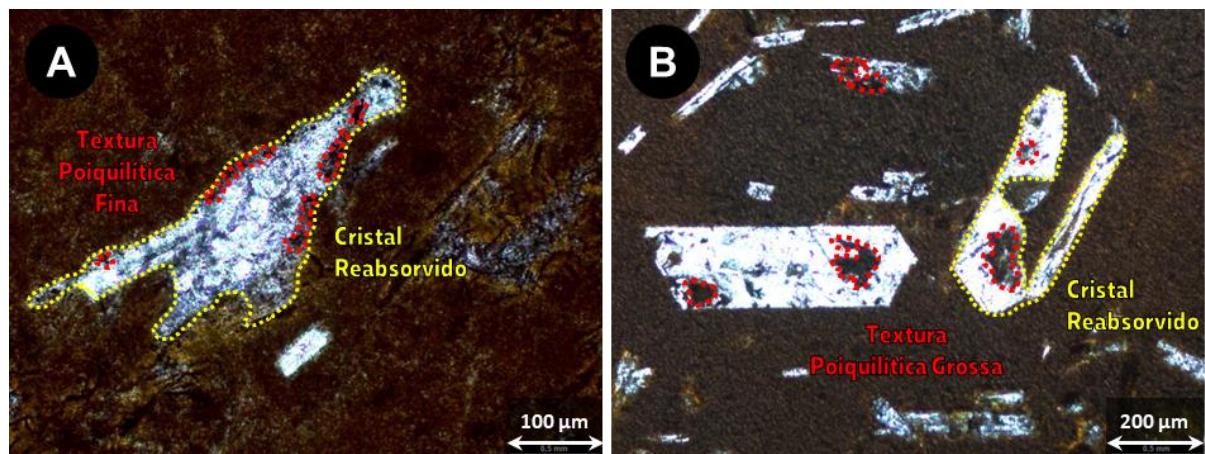


**Figura 4.3** - Exemplos de microtexturas em feldspatos. Modificado de Renjith (2014).

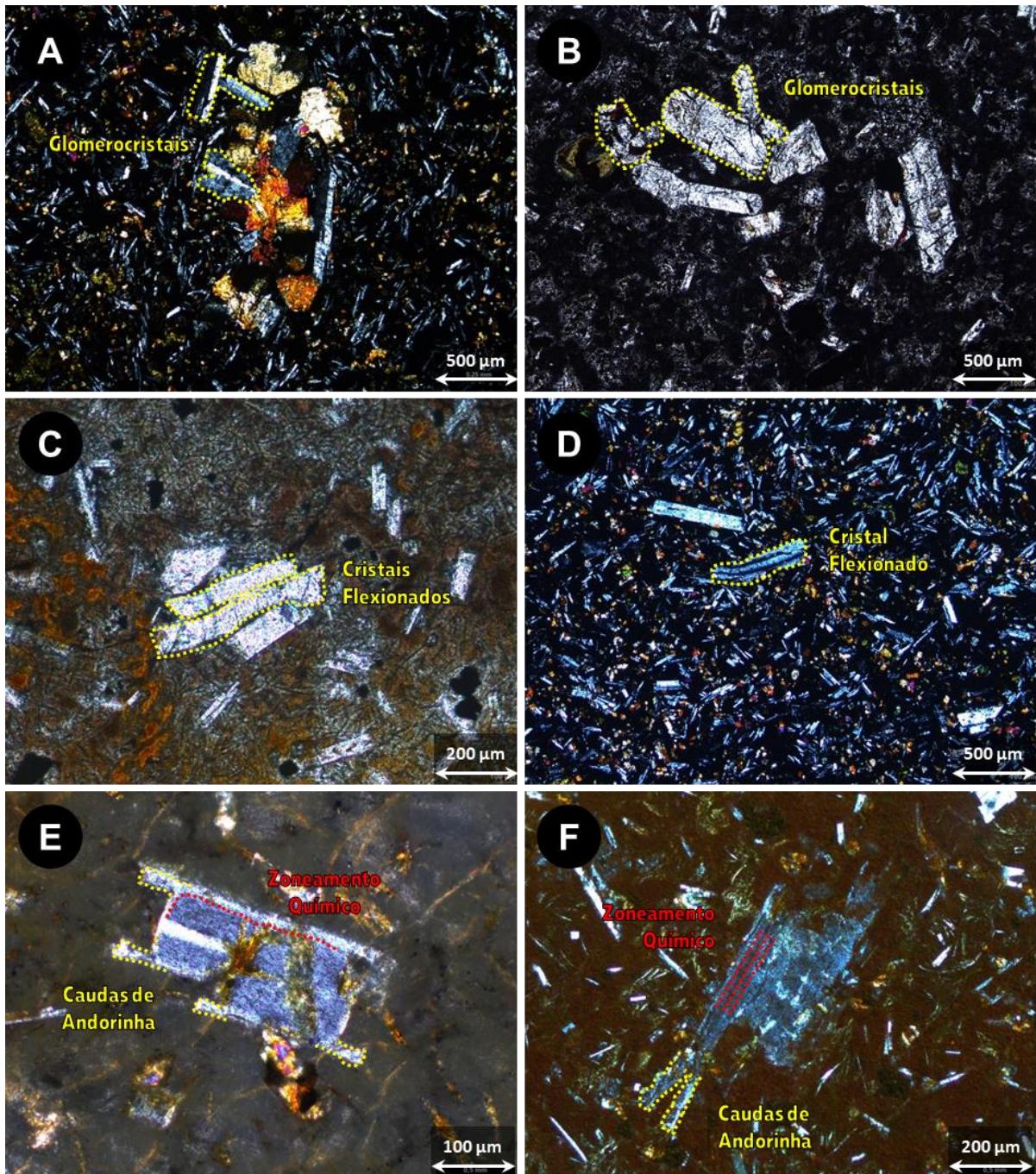
#### 4.1.1.1 Plagioclásio

Os plagioclásios compõem de 5 a 10% das amostras do PPA e de 15 a 20% das amostras do PSJ, ocorrendo nas fases microfenocristal, matriz e micrólito. Além do nítido contraste em termos de granulação/granulometria, essas três gerações apresentam, ainda, diferenças texturais e composicionais, assim como descrito a seguir.

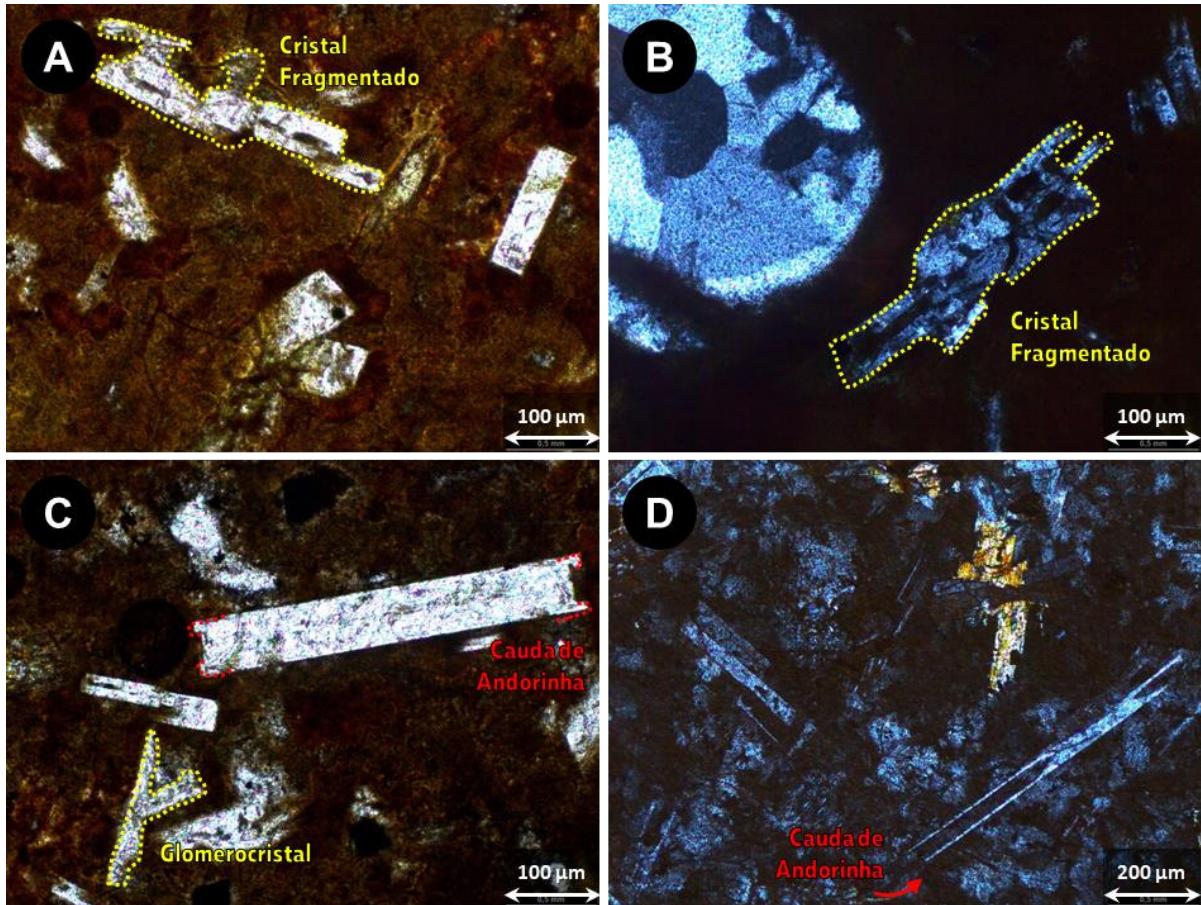
Os microfenocristais são, em sua maioria, determinados como andesina cujo teor de anortita varia de 25 a 44%. São cristais incolores, límpidos, localmente turvos devido à sericitização incipiente a moderada. Têm granulação muito fina a fina, variando de 0,2 a 0,8 mm, e hábito subédrico a euédrico ripiforme, podendo, em alguns casos, conter inclusões de minerais opacos e, menos comumente, augita. O fraturamento é incipiente a moderado e, em grande parte das amostras, é observada orientação também incipiente a moderada. Das texturas observadas predominam cristais reabsorvidos muitas vezes associados a texturas poiquiliticas finas e grossas (Figuras 4.4A e 4.4B, respectivamente), glomerocristais (Figuras 4.5A e 4.4B), cristais flexionados (Figuras 4.5C e 4.5D), zoneamentos químicos (Figuras 4.5E e 4.5F), cristais fragmentados (Figuras 4.6A e 4.6B) e, subordinadamente, caudas de andorinha (Figuras 4.6C e 4.6D).



**Figura 4.4** - Fotomicrografias de texturas em microfenocristais de andesina: A) em LC-12-2, da litofácies *pitchstone* do PPA, destaca-se o microfenocristal com as bordas corroídas associadas a inclusões da matriz vítrea e de minerais opacos de granulação muito fina, caracterizando uma textura poiquilitica muito fina (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 20x); B) em SJ-258, da litofácies *pitchstone* amigdaloidal do PSJ, denota-se a corrosão pervasiva do microfenocristal à direita, assim como a textura poiquilitica cujas inclusões, relativamente mais grossas que as da fotomicrografia anterior, são pervasivas em todo o cristal (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 10x).

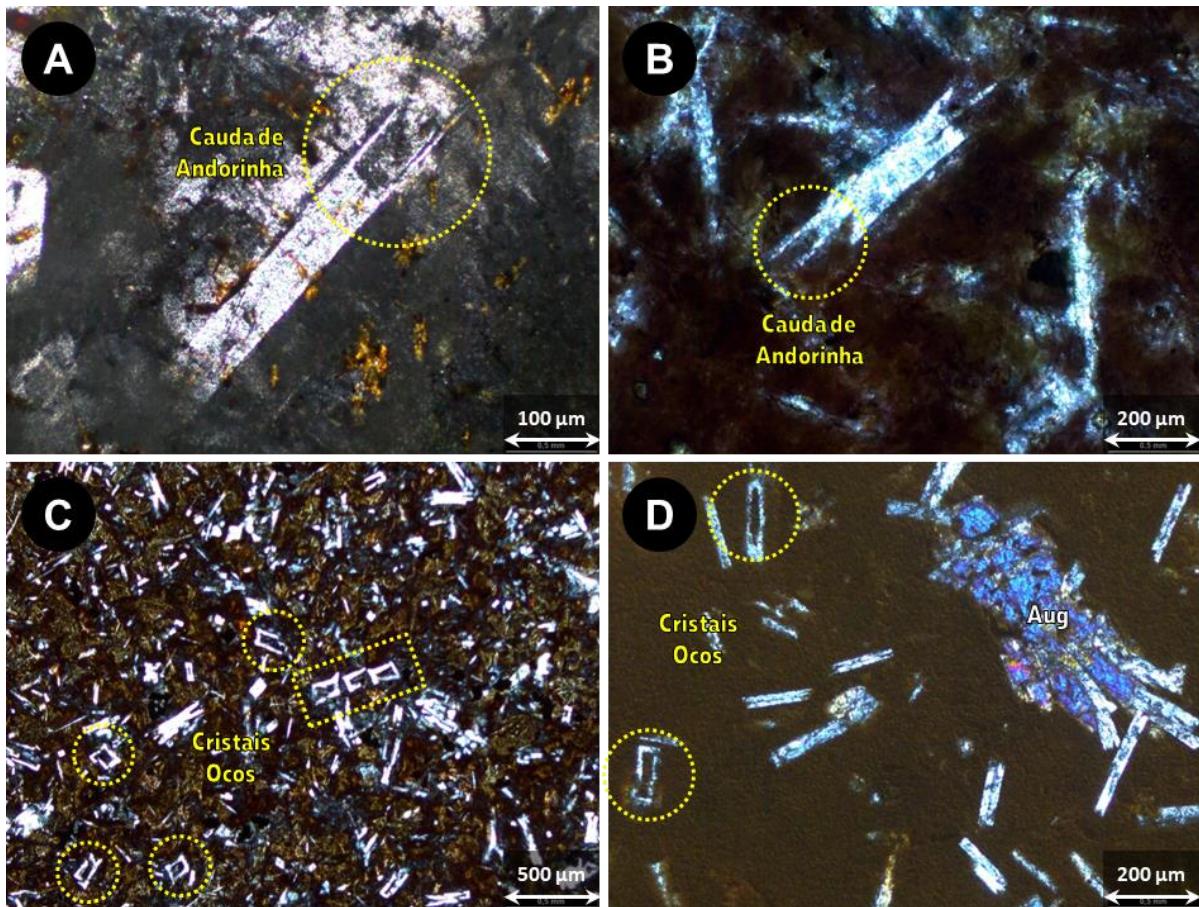


**Figura 4.5** - Fotomicrografias de texturas em microfenocristais de andesina: A) em LC-29-1, da litofácies *pitchstone* do PPA, observa-se, ao centro, um agregado glomeroporfirítico com glomerocristais de andesina (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 4x); B) em SJ-250, da litofácies dacito bandado do PSJ, mais um agregado glomeroporfirítico com glomerocristais de andesina destaca-se da matriz hipohialina (fotomicrografia a polarizadores parelelos com objetiva de 4x); C) em LC-25-1, da litofácies riolito afanítico do PPA, verifica-se a ocorrência de microfenocristais flexionados (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 10x); D) em LC-29-1, da litofácies *pitchstone* do PPA, a flexão do microfenocristal em destaque é evidenciada pelo arqueamento das geminações polissintéticas (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 4x); E) em LC-01-6, da litofácies riolito maciço do PPA, verifica-se zoneamento suave do centro à borda, onde se torna brusco associando-se às caudas de andorinha (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 20x); F) em SJ-032, da litofácies dacito hialino com geodos do PSJ, observa-se zoneamento oscilatório fino em microfenocristal parcialmente fragmentado, reabsorvido e com caudas de andorinha associadas (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 10x).



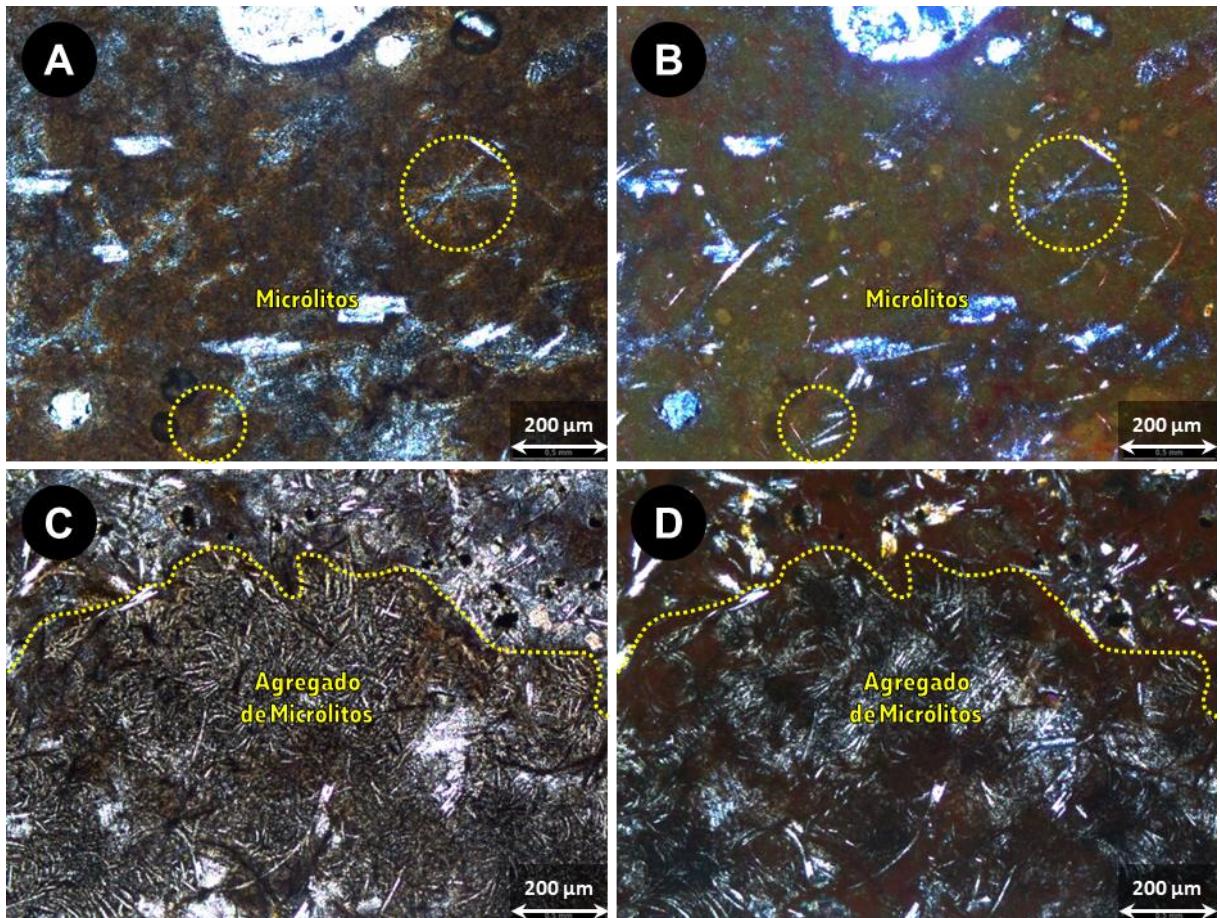
**Figura 4.6** - Fotomicrografias de texturas em microfenocristais de andesina: A) em LC-20-6, da litofácies *pitchstone* do PPA, destaca-se o intenso fraturamento e fragmentação da fase microfenocristal (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 20x); B) em SJ-258, da litofácies *pitchstone* amigdaloidal do PSJ, verifica-se um cristal intensamente fraturado e fragmentado próximo à amígdala preenchida por quartzo (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 20x); C) em LC-20-6, da litofácies *pitchstone* do PPA, microfenocristal exibe cauda de andorinha de “pequeno porte”. Destaque também ao glomerocristal no canto esquerdo inferior (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 20x); D) em SJ-015-A1, da litofácies dacito maciço do PSJ, evidencia-se dois microfenocristais com caudas de andorinha de “grande porte” (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 10x).

Já os plagioclásios que compõem a matriz são, em sua maioria, determinados como oligoclásio cujo teor de anortita varia de 20 a 29%. São cristais incolores, límpidos, raramente turvos devido à sericitização incipiente. Têm granulação muito fina, variando de 0,06 a 0,15 mm, e hábito subédrico a euédrico ripiforme, pontualmente contendo inclusões de minerais opacos. O fraturamento é ausente e, em grande parte das amostras, é observada orientação moderada. Das texturas observadas predominam caudas de andorinha (Figuras 4.7A e 4.7B) e cristais ocos (Figuras 4.7C e 4.7D).



**Figura 4.7** - Fotomicrografias de texturas em oligoclásio da matriz: A) em LC-11-4, da litofácies riolito com disjunções em laje do PPA, cristal da matriz com cauda de andorinha bem desenvolvida (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 20x); B) em SJ-228-A, da litofácies pitchstone maciço do PSJ, também evidencia-se cristal da matriz com cauda de andorinha bem desenvolvida (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 10x); C) em SJ-032, da litofácies dacito hialino com geodos do PSJ, verifica-se a abundância de cristais de oligoclásio ocos (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); D) em SJ-258, da litofácies pitchstone amigdaloidal de São Joaquim, dá-se detalhe aos cristais ocos. Menção à augita intensamente fraturada à direita (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 10x).

A terceira e última ocorrência do plagioclásio nessas rochas é sob a forma de micrólitos, cristais incolores, límpidos, de granulação muito fina (inferior à matriz), de hábito acicular e predominantemente retilíneos e, subordinadamente, curvilíneos (Figura 4.8). Estes se associam ao vidro vulcânico e podem ocorrer isolados ou em agregados radiais, muitas vezes orientados.

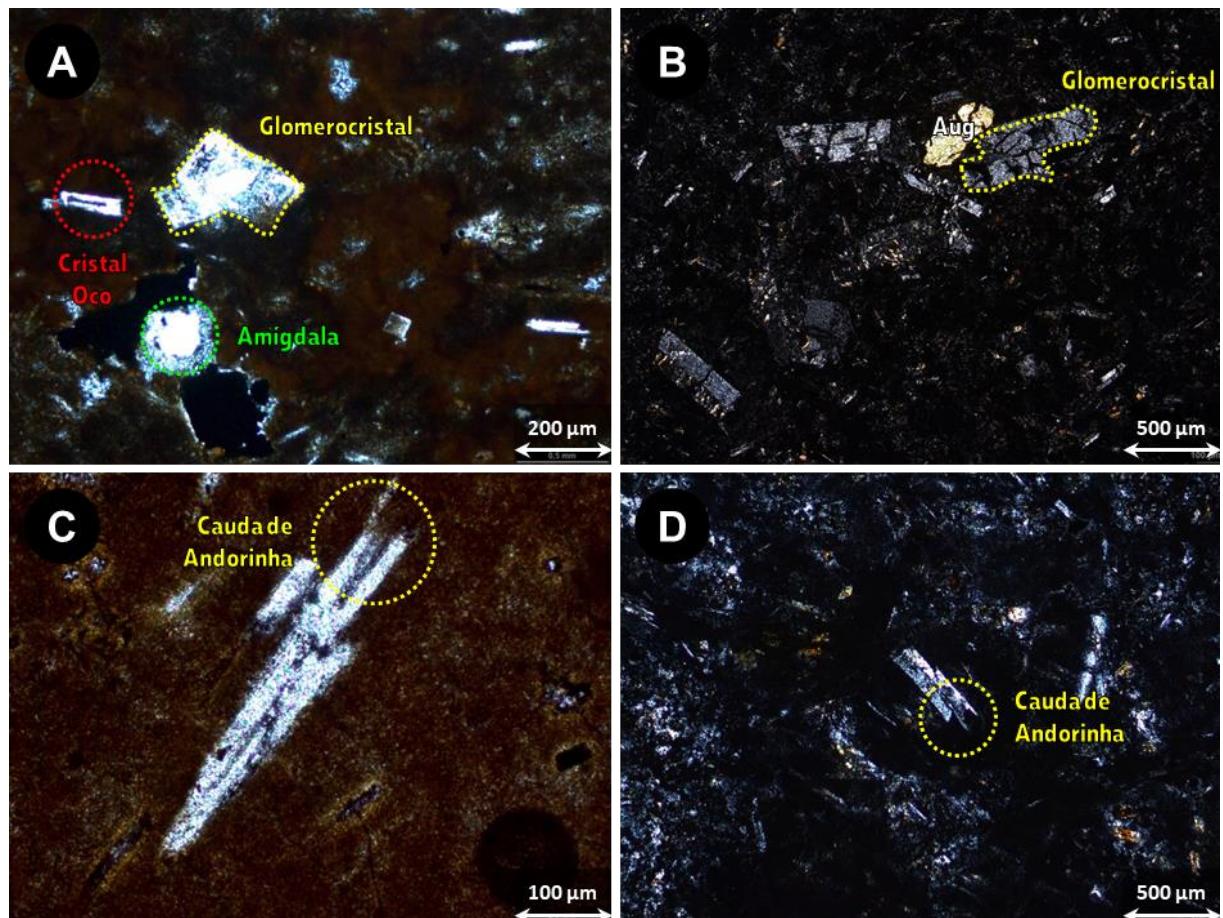


**Figura 4.8** - Fotomicrografias de micrólitos de plagioclásio: A e B) em LC-15-1A, da litofácies riolito com disjunções em laje do PPA, observam-se os micrólitos aciculares em meio à matriz vítrea (fotomicrografias a polarizadores paralelos e cruzados, respectivamente, com objetiva de 10x); C e D) em SJ-066, da litofácies dacito litoidal a vítreo com amígdalas do PSJ, agregados de micrólitos ocorrem próximos a uma amígdala. (fotomicrografia a polarizadores paralelos e cruzados, respectivamente, com objetiva de 10x).

#### 4.1.1.2 Sanidina

A sanidina constitui de 15 a 20% das amostras do PPA e de 5 a 10% das amostras do PSJ, ocorrendo nas fases microfenocristal e matriz. Em geral, são cristais incolores, límpidos, podendo ser turvos devido à sericitização incipiente a moderada, principalmente os microfenocristais. Estes têm granulação muito fina a fina, variando, assim como os plagioclásios, de 0,2 a 0,8 mm. Quando ocorrem na matriz, a dimensão dos cristais varia de 0,05 a 0,10 mm. O hábito é subédrico a euédrico tabular, podendo conter inclusões de minerais opacos e augita. O fraturamento é moderado nos microfenocristais e ausente na matriz, enquanto a orientação, quando presente, é mais pronunciada na última. Difere-se dos plagioclásios pelo hábito e também pela geminação simples bem desenvolvida com

extinção reta associada. Texturas minerais comuns são glomerocristais (Figuras 4.9A e 4.9B) e caudas de andorinha (Figuras 4.9C e 4.9D).

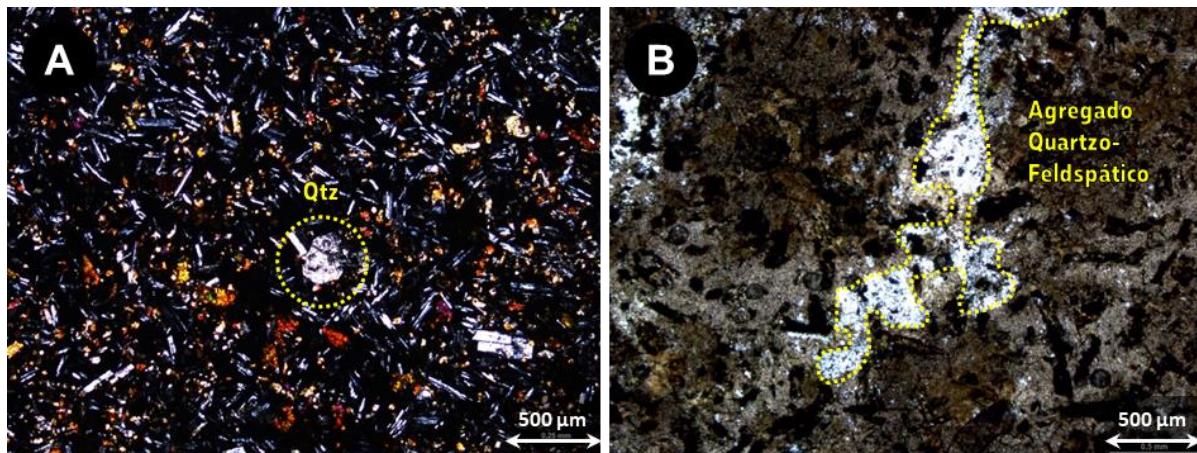


**Figura 4.9** - Fotomicrografias de texturas em sanidina: A) em LC-15-1A, da litofácies riolito com disjunções em laje do PPA, glomerocristal de sanidina. À esquerda, cristal oco de oligoclásio; abaixo, amígdala preenchida por quartzo (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 10x); B) em SJ-250, da litofácies dacito bandado do PSJ, agregado glomeroporfirítico com glomerocristal de sanidina e microfenocristal de augita cloritizado à esquerda. Vale ressaltar a sericitização e o fraturamento moderado dos feldspatos (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 4x); C) em LC-12-2, da litofácies *pitchstone* do PPA, microfenocristal com cauda de andorinha (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 20x); D) em SJ-250, da litofácies dacito bandado do PSJ, microfenocristal com cauda de andorinha ao centro (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 4x).

#### 4.1.1.3 Quartzo

O quartzo representa de 5 a 15% das amostras do PPA e do PSJ, ocorrendo principalmente na fase matriz e, raramente, no que se assemelha a uma fase microfenocristal (Figura 4.10A). Em geral, são cristais incolores, límpidos, de granulação muito fina com, no máximo, 0,1 mm, podendo chegar a 0,5 mm na fase microfenocristal. O hábito é comumente anédrico com fraturamento e orientação

ausente, por vezes exibindo extinção ondulante. Podem ocorrer como cristais isolados na matriz vítreia ou, mais comumente, associados a agregados quartzo-feldspáticos (Figura 4.10B).



**Figura 4.10** - Fotomicrografias das fases de quartzo: A) em LC-29-1, da litofácie *pitchstone* do PPA, é indicado um possível microfenocristal de quartzo (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 4x); B) em LC-28-1, da litofácie riolito com disjunções em laje do PPA, observa-se, ao centro, um agregado quartzo-feldspático em meio à matriz vítreia (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x).

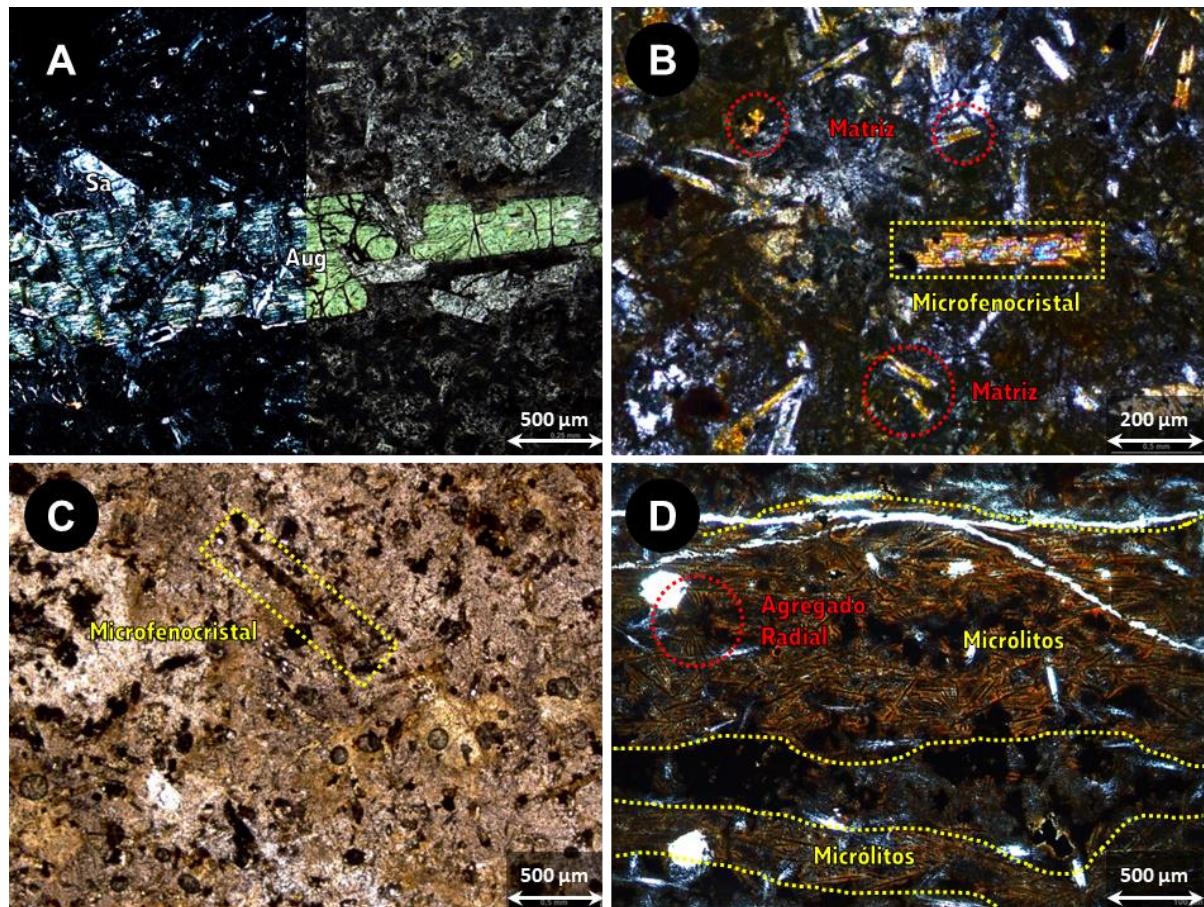
#### 4.1.1.4 Augita

A augita comprehende de 5 a 10% das amostras do PPA e do PSJ, ocorrendo nas fases microfenocristal, matriz e micrólito, cujas diferenças residem principalmente em características morfológicas e texturais.

Os microfenocristais são incolores, límpidos, por vezes com pleocroísmo muito fraco para tons rosados. Quando alterados são verdes pálidos (cloritização) (Figura 4.11A), podendo ocorrer minerais opacos associados à fase secundária. Têm granulação muito fina a fina, variando de 0,5 a, no máximo, 3,0 mm em casos especiais. O hábito é subédrico a euédrico tabular (Figura 4.11B), por vezes acicular (Figura 4.11C), o fraturamento moderado a intenso e a orientação, quando presente na amostra, incipiente.

Já a augita que compõe a matriz é representada por cristais incolores, límpidos, comumente apresentando um pleocroísmo muito fraco a fraco para tons rosados. Têm granulação muito fina, na ordem de 0,1 mm, e hábito predominantemente anédrico, localmente subédrico tabular. Fraturamento e alteração são ausentes e a orientação, quando existente, incipiente a moderada.

Por fim, os micrólitos são cristais incolores, límpidos, de granulação muito fina (inferior à matriz) e de hábito acicular (Figura 4.11D). Associam-se ao vidro vulcânico e ocorrem isolados ou em agregados radiais, muitas vezes orientados.

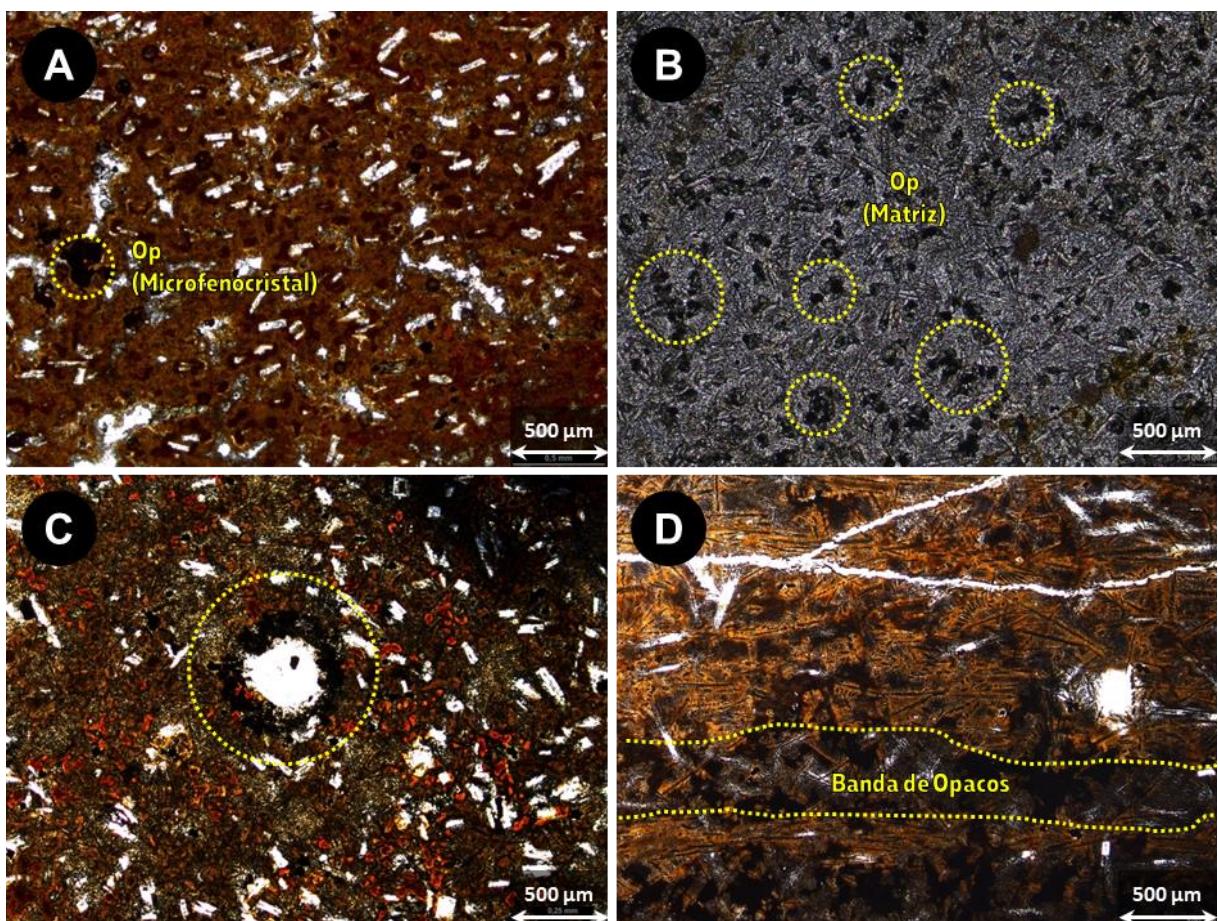


**Figura 4.11** - Fotomicrografias das fases de augita: A) em SJ-250, da litofácie *pitchstone* amigdaloidal do PSJ, microfenocristal de augita intensamente cloritizado (fotomicrografias a polarizadores cruzados e paralelos, respectivamente, com objetiva de 4x); B) em LC-23-1, da litofácie riolito afanítico do PPA, fases microfenocristal e matriz de augita (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 10x); C) em LC-28-1, da litofácie riolito com disjunções em laje do PPA, microfenocristal acicular de augita intensamente alterado com geração de minerais opacos secundários (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); D) em SJ-083, da litofácie dacito bandado do PSJ, micrólitos retilíneos orientados paralelos ao bandamento e, no canto esquerdo, formando agregado radial (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 4x).

#### 4.1.1.5 Minerais Opacos

Os minerais opacos compõem de 5 a 10% das amostras do PPA e do PSJ, ocorrendo principalmente na fase matriz (Figura 4.12A) e, subordinadamente, na fase microfenocristal (Figura 4.12B). Em geral, são cristais de granulação muito fina a fina, normalmente na ordem de 0,08 a 0,10 mm. O hábito é subédrico a euédrico

tabular ou prismático, podendo apresentar terminações piramidais. Fraturamento e orientação são incipientes, assim como a alteração (oxidação, principalmente). Podem ocorrer como cristais isolados na matriz vítreia ou, ainda, associados a amígdalas (Figura 4.12C) ou a bandas (Figura 4.12D).



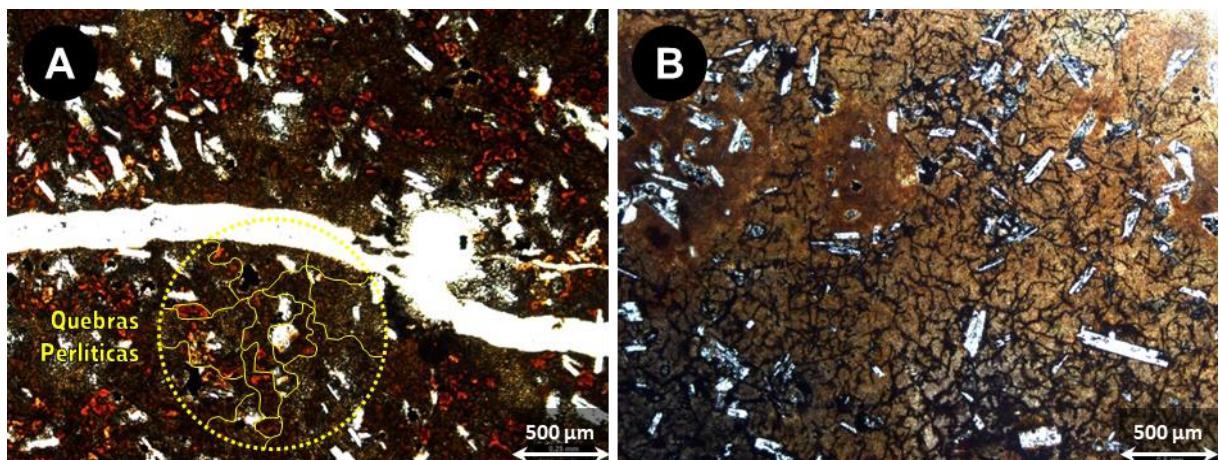
**Figura 4.12** - Fotomicrografias das fases de minerais opacos: A) em LC-20-6, da litofácies *pitchstone* do PPA, destaca-se o microfenocristal de mineral opaco à direita (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); B) em SJ-054, da litofácies *pitchstone* macizo do PSJ, observa-se os minerais opacos disseminados na matriz (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); C) em LC-25-1, da litofácies riolito afanítico do PPA, verifica-se a associação de minerais opacos na borda de uma amígdala preenchida por quartzo (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); D) em SJ-083, da litofácies dacito bandado do PSJ, minerais opacos ocorrem em bandas (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x).

#### 4.1.2 Feições de Desvitrificação

O vidro vulcânico é uma fase metaestável que, uma vez formada, é muito suscetível a modificações texturais e compostionais estimuladas pela ação de processos hidrotermais, diagenéticos, metamórficos e/ou meteóricos (McPhie *et al.*, 1993). Nas amostras do PPA, a matriz hipohialina é isótropa e predominantemente

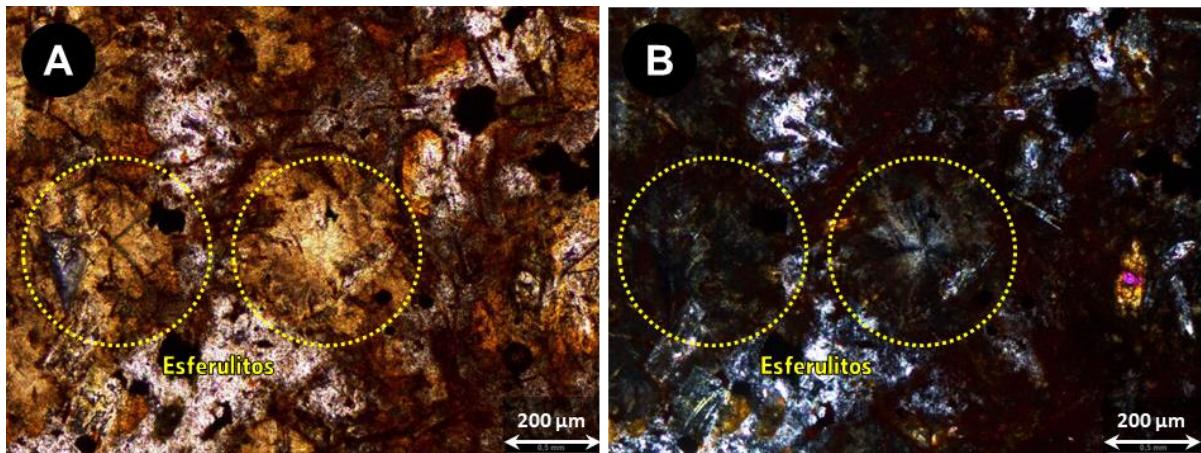
castanha média a avermelhada, salvo a litofácie *pitchstone*, na qual é opaca. Nas amostras do PSJ ocorre tanto vidro incolor como castanho avermelhado, ambos isótropos. Em ambas as regiões, no entanto, quando a matriz passa a se apresentar castanha clara é possível observar uma leve birrefringência, indicando o início do processo de desvitrificação, representado aqui pelas quebras perlíticas, pelos esferulitos e por processos de oxidação, cloritização e, mais raramente, argilização do vidro vulcânico.

As quebras perlíticas são relativamente comuns nas litofácies com alta porcentagem de matriz vítreia e comumente formam redes interconectadas cujas bordas se apresentam moderadamente a intensamente alteradas, na maioria das vezes oxidadas (Figura 4.13).



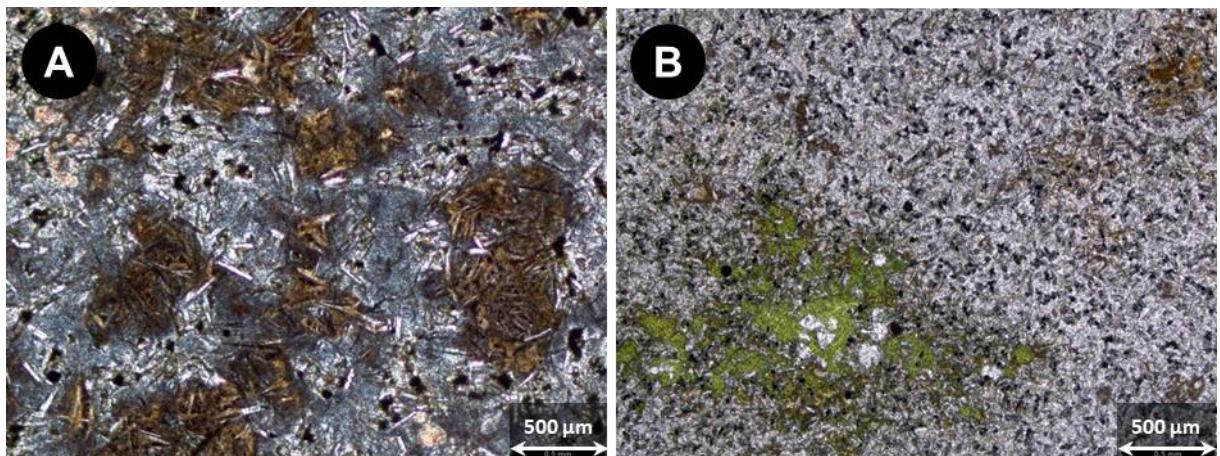
**Figura 4.13** - Fotomicrografias de quebras perlíticas: A) em LC-25-1, da litofácie riolito afanítico do PPA, as regiões com maior densidade de quebras perlíticas são também as mais oxidadas (fotomicrografia a polarizadores paralelos em objetiva de 4x); B) em SJ-258, da litofácie *pitchstone* amigdaloidal de São Joaquim, minerais opacos ocorrem associados às quebras perlíticas (fotomicrografia a polarizadores paralelos em objetiva de 4x).

Os esferulitos ocorrem associados às porções claras do vidro vulcânico, nas quais o processo de desvitrificação já se encontra em andamento. Relativamente mais comuns nas amostras de Palmas, eles são, em sua maioria, fibrorradiados (subordinadamente em leque) com incremento da birrefringência em direção ao centro, indicando crescimento do interior para as bordas (Figura 4.14). Em alguns raros casos, cristais de sanidina e oligoclásio disseminados na matriz podem constituir núcleos para sua formação.



**Figura 4.14** - Fotomicrografias de esferulitos: A e B) em LC-16-3, da litofácie riolito com disjunções em laje do PPA, é clara a associação dos esferulitos às porções mais claras da matriz vítrea. Detalhe para os dois espécimes de texturas diferentes: o esquerdo em leque e o direito fibrorradiado (fotomicrografia a polarizadores paralelos e cruzados, respectivamente, com objetiva de 10x).

Por fim, a desvitrificação é também evidenciada por processos de oxidação (Figura 4.15A), cloritização (Figura 4.15B) e, subordinadamente, argilização. Estas ocorrem principalmente associadas a descontinuidades na rocha, sejam quebras perlíticas, fraturas, vênulas e/ou veios, muitas vezes se desenvolvendo em torno de cristais da matriz (assim como os esferulitos).

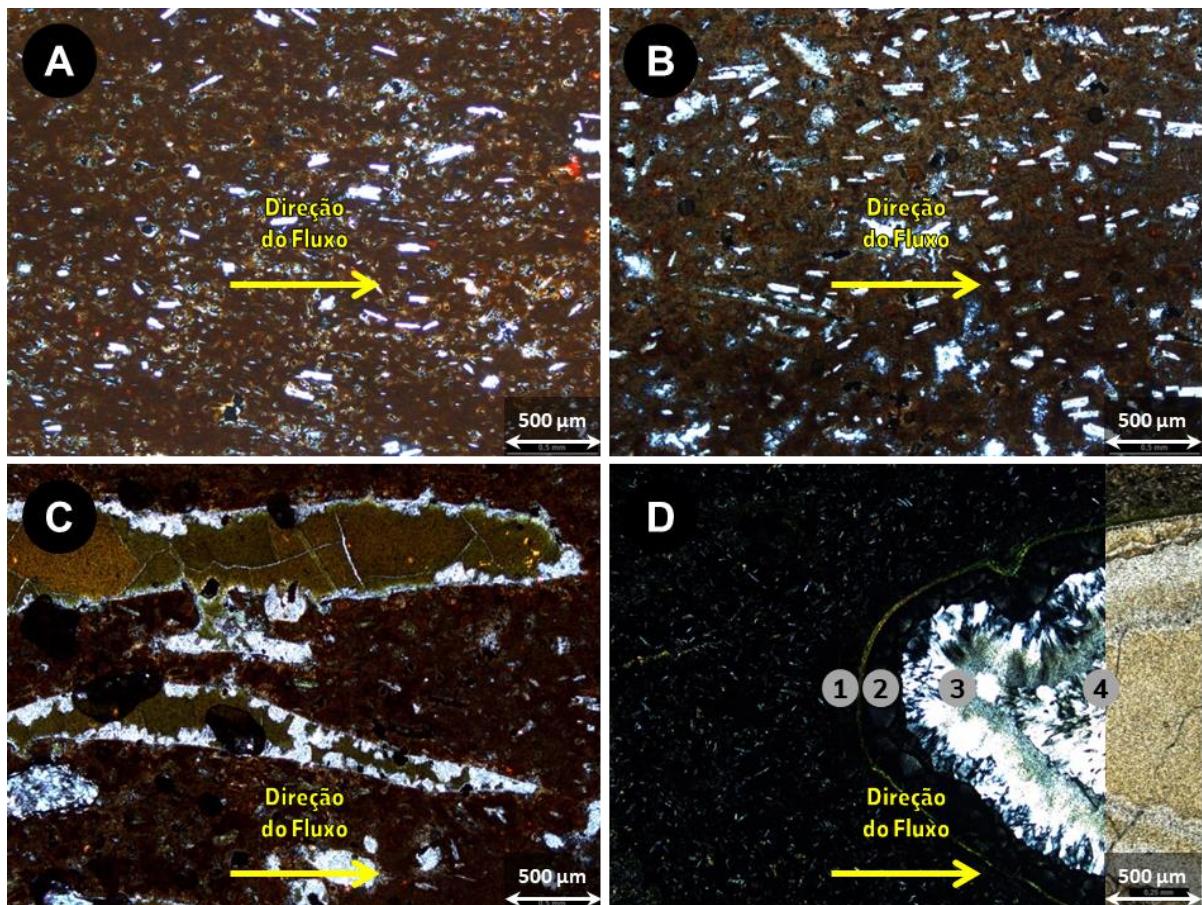


**Figura 4.15** - Fotomicrografias de processos de alteração da matriz vítrea: A) em SJ-066, da litofácie dacito litoidal a vítreo com amígdalas do PSJ, porções oxidadas da matriz ressaltam os micrólitos de plagioclásio (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 10x); B) em SJ-055-A, da litofácie *pitchstone* maciço do PSJ, a cloritização se destaca no vidro incolor (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x).

#### 4.1.3 Feições Estruturais

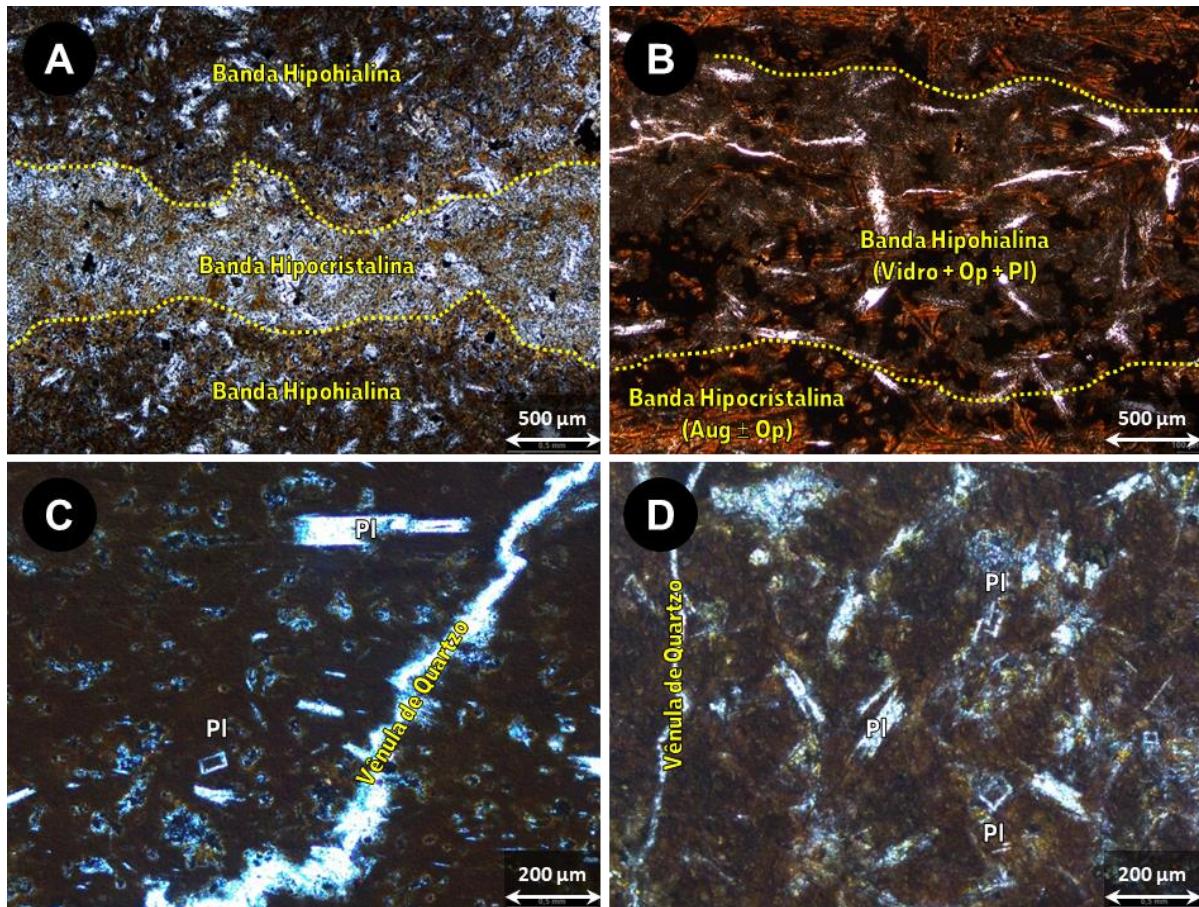
A estrutura mais comum entre as rochas descritas é a fluidal, demarcada tanto pela orientação de microfenocristais, matriz e micrólitos (Figuras 4.16A e

4.16B) como de amígdalas achatadas e também orientadas segundo a direção do fluxo (Figura 4.16C). Essas amígdalas têm preenchimento multifásico geralmente representado pelo quartzo e, subordinadamente, clorita, celadonita e/ou zeólitas (Figura 4.16D).



**Figura 4.16** - Fotomicrografias de estruturas indicativas de fluxo: A) em LC-12-3, da litofácies *pitchstone* do PPA, microfenocristais e matriz orientados definindo a direção de fluxo (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); B) em LC-20-6, da litofácies *pitchstone* do PPA, microfenocristais e matriz também definem a direção de fluxo (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); C) em LC-20-6, da litofácies *pitchstone* do PPA, amígdalas achatadas preenchidas por quartzo e clorita se orientam segundo o fluxo (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); D) em SJ-054, da litofácies *pitchstone* maciço do PSJ, amígdala achatada com preenchimento multifásico (1 - celadonita; 2 - calcedônia; 3 - quartzo microcristalino; 4 - zeólita), também indicadora da direção de fluxo (fotomicrografia a polarizadores paralelos e cruzados, respectivamente, com objetiva de 4x).

Subordinadamente ocorrem estruturas bandadas determinadas pelo contraste de cor entre a matriz vítreia (Figura 4.17A) e/ou pela ausência, presença ou variação na porcentagem de fases minerais específicas (Figura 4.17B). Por fim, também se observam vênulas/veios, geralmente preenchidos por quartzo e, menos comumente, óxidos e hidróxidos de ferro (Figuras 4.17C e 4.17D).



**Figura 4.17** - Fotomicrografias de estruturas bandadas e vênulas/veios: A) em LC-16-2, da litofácie litolito afanítico do PPA, o bandamento é definido pela variação de cor do vidro vulcânico e pelo conteúdo de cristais (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); B) em SJ-083, da litofácie dacito bandado do PSJ, o bandamento é demarcado pela intercalação de regiões pervasivamente oxidadas nas quais predominam micrólitos de augita com faixas castanhas escuras nas quais predominam micrólitos de plagioclásio e minerais opacos (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 4x); C) em LC-12-3, da litofácie *pitchstone* do PPA, vênula curvilínea preenchida por quartzo corta a matriz. Destaque ao microfenocristal de andesina fragmentado e ao oligoclásio oco da matriz (fotomicrografia a polarizadores cruzados com objetiva de 10x); D) em SJ-228-A, da litofácie *pitchstone* macizo do PSJ, vênula semi-retilínea corta a matriz. Destaque ao microfenocristal de andesina com cauda de andorinha e aos oligoclásios ocos da matriz (fotomicrografia a polarizadores paralelos com objetiva de 10x).

### 3.1 CATODOLUMINESCÊNCIA MONOCROMÁTICA

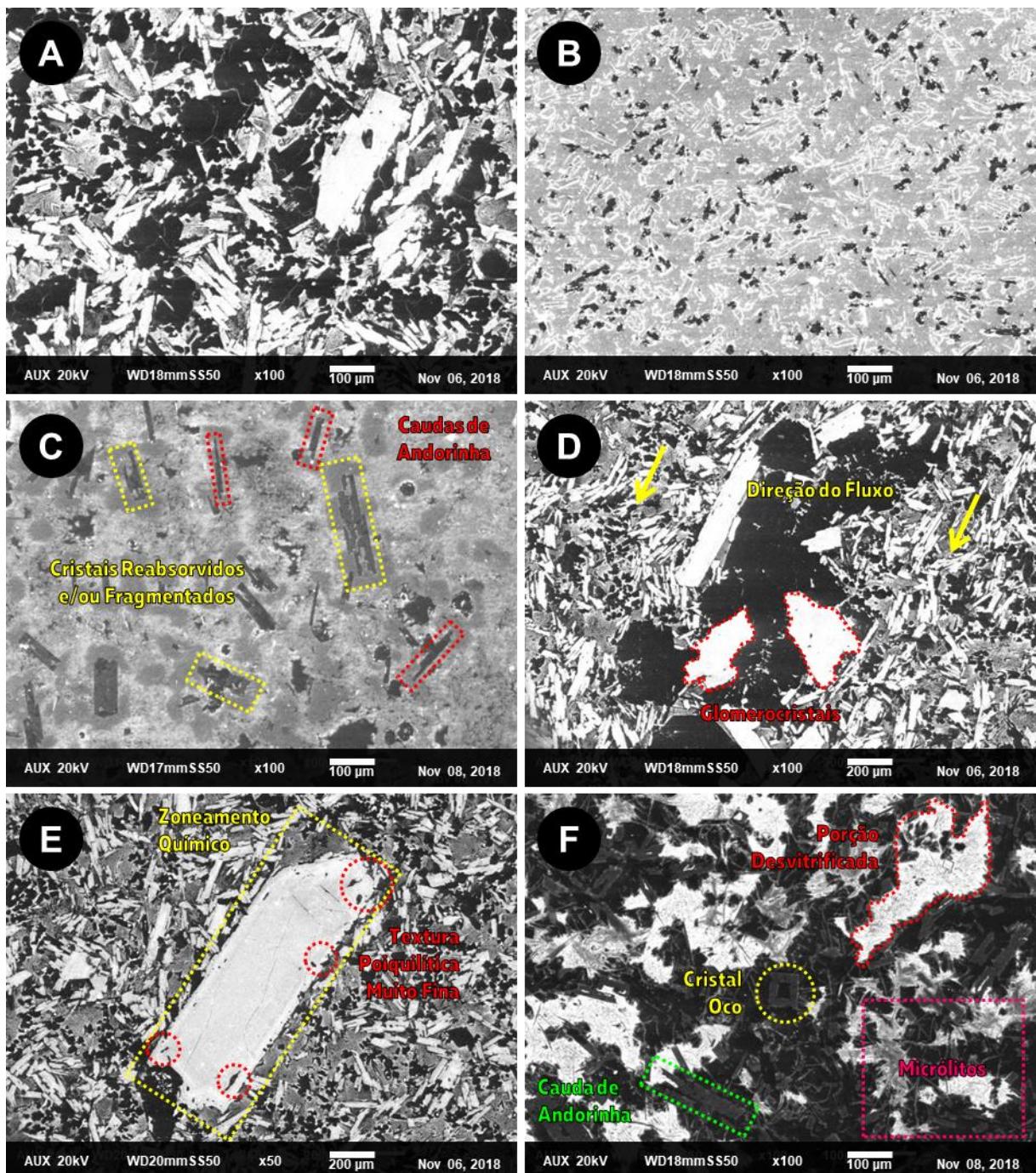
Foram submetidas à CL monocromática 5 amostras de cada área de estudo, selecionadas de acordo com o volume de informações obtido a partir da análise petrográfica e de modo que retratassem as litofácies com maior representatividade no universo amostral. A Tabela 4.2 traz uma compilação das observações nessa análise, as quais se resumem à diferença na resposta dos plagioclásios à CL em diferentes litofácies, a texturas minerais e, subordinadamente, a porções bandadas

e/ou desvitrificadas (demarcadas por respostas contrastantes à CL) e ao preenchimento multifásico de amígdalas.

**Tabela 4.2** - Compilação das observações à CL (Abreviações: PI - plagioclásios; P - microfenocristal (*phenocryst*); G - matriz (*groundmass*); M - micrólito; VV - vidro vulcânico. Cores: **vermelho** - não luminesceu/luminesceu incipientemente; **amarelo** - luminesceu moderadamente; **verde** - luminesceu intensamente).

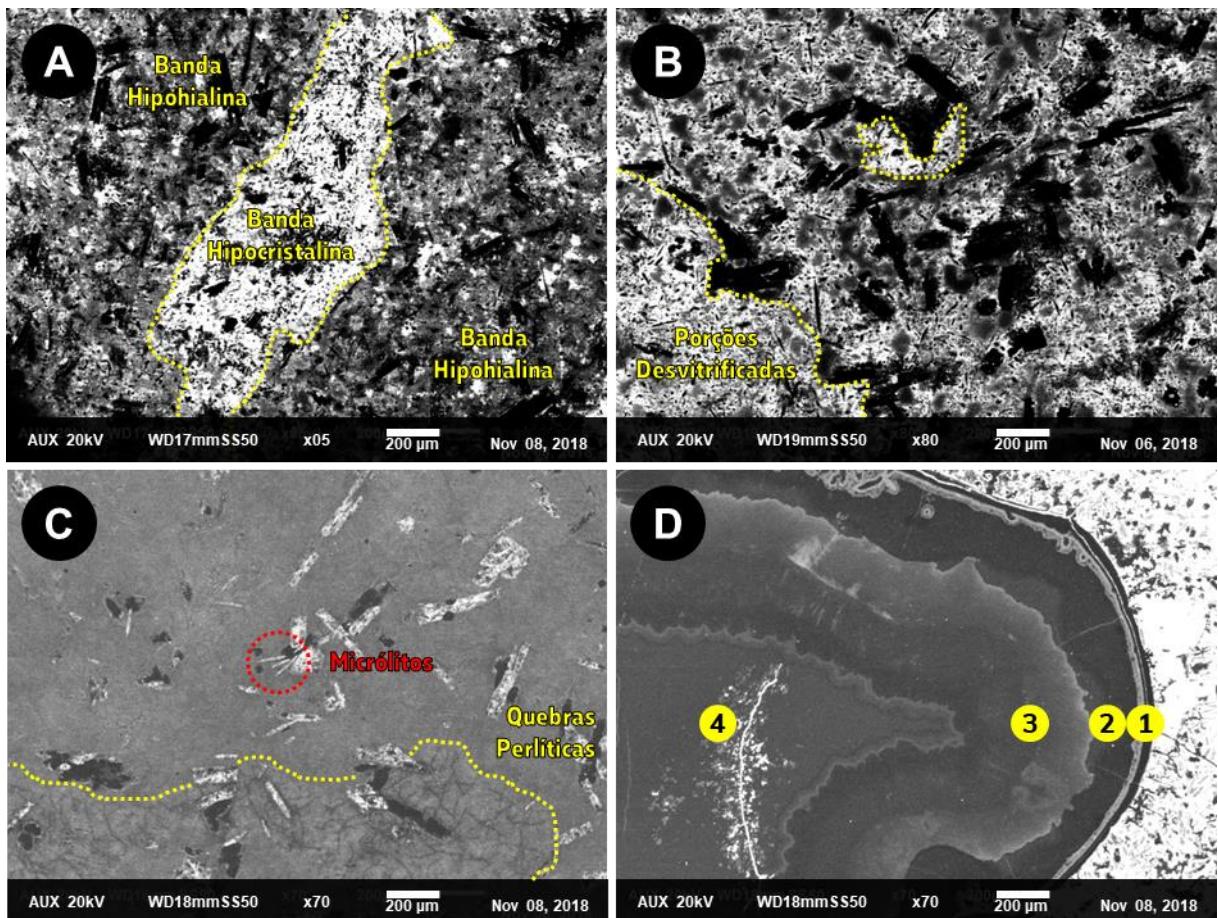
AMOSTRA	LITOFAÍCIES	LUMINESCÊNCIA				OBSERVAÇÕES
		PI			VV	
		P	G	M		
<b>Platô de Palmas (PPA), PR</b>						
LC-16-2	Riolito Afanítico					Texturas minerais; bandamento.
LC-20-6	<i>Pitchstone</i>					Texturas minerais.
LC-25-1	Riolito Afanítico					Texturas minerais; desvitrificação.
LC-28-1	Riolito com Disjunções em Laje					Texturas minerais; bandamento.
LC-29-1	<i>Pitchstone</i>					Texturas minerais.
<b>Platô de São Joaquim (PSJ), SC</b>						
SJ-032	Dacito Hialino com Geodos					Texturas minerais.
SJ-054	<i>Pitchstone</i> Maciço					Texturais minerais; amígdalas.
SJ-105-A	Dacito Bandado					Texturas minerais; desvitrificação.
SJ-250	Dacito Bandado					Texturas minerais; desvitrificação.
SJ-258	<i>Pitchstone</i> Amigdaloidal					Texturais minerais; amígdalas.

Em geral, os plagioclásios só luminesceram nas litofácies com as maiores porcentagens de vidro vulcânico: a litofácie *Pitchstone* do PPA (Figura 4.18A) e as litofácies Dacito Hialino com Geodos e *Pitchstones* Maciço e Amigdaloidal do PSJ (Figura 4.18B). Apesar da resposta positiva à CL ter se limitado a estas amostras, as informações texturais são abundantes e incluem cristais reabsorvidos, fraturados e fragmentados (Figura 4.18C), glomerocristais (Figura 4.18D), zoneamentos químicos (Figura 4.18E), cristais ocos e micrólitos (Figura 4.18F), corroborando as observações petrográficas descritas na seção anterior.



**Figura 4.18** - Fotomicrografias de plagioclásios à CL: A) em LC-29-1, da litofácies *pitchstone* do PPA, os plagioclásios luminescem intensamente; B) em SJ-054, da litofácies *pitchstone* macizo do PSJ, os plagioclásios luminescem intensamente nas bordas, sugerindo zoneamento químico; C) em LC-20-6, da litofácies *pitchstone* do PPA, destacam-se cristais de plagioclásio parcialmente reabsorvidos, intensamente fraturados e fragmentados, além de caudas de andorinha; D) em LC-29-1, da litofácies *pitchstone* de PPA, verificam-se glomerocristais de plagioclásio associados a minerais não luminescentes em um agregado glomeroporfírtico, além da orientação moderada a intensa dos plagioclásios da matriz caracterizando estrutura de fluxo; E) ainda em LC-29-1, da litofácies *pitchstone* de PPA, constata-se um microfenocristal com zoneamento químico e inclusões de minerais não luminescentes na borda que poderiam sugerir uma textura poiquilítica muito fina; F) em SJ-032, da litofácies dacito hialino com geodos do PSJ, observa-se ao centro um plagioclásio oco da matriz, assim como outro cristal com cauda de andorinha e inúmeras aciculadas da fase microlítico. Notar também porções da matriz com luminescência intensa, provavelmente correspondendo a regiões com atuação de processos de desvitrificação.

Em complemento à caracterização dos plagioclásios, verificou-se a resposta positiva à CL de regiões específicas da matriz vítreia, seja bandas (Figura 4.19A) ou porções desvitrificadas (Figuras 4.19B e 4.19C), além de mais evidências do preenchimento multifásico de amígdalas (Figura 4.19D).

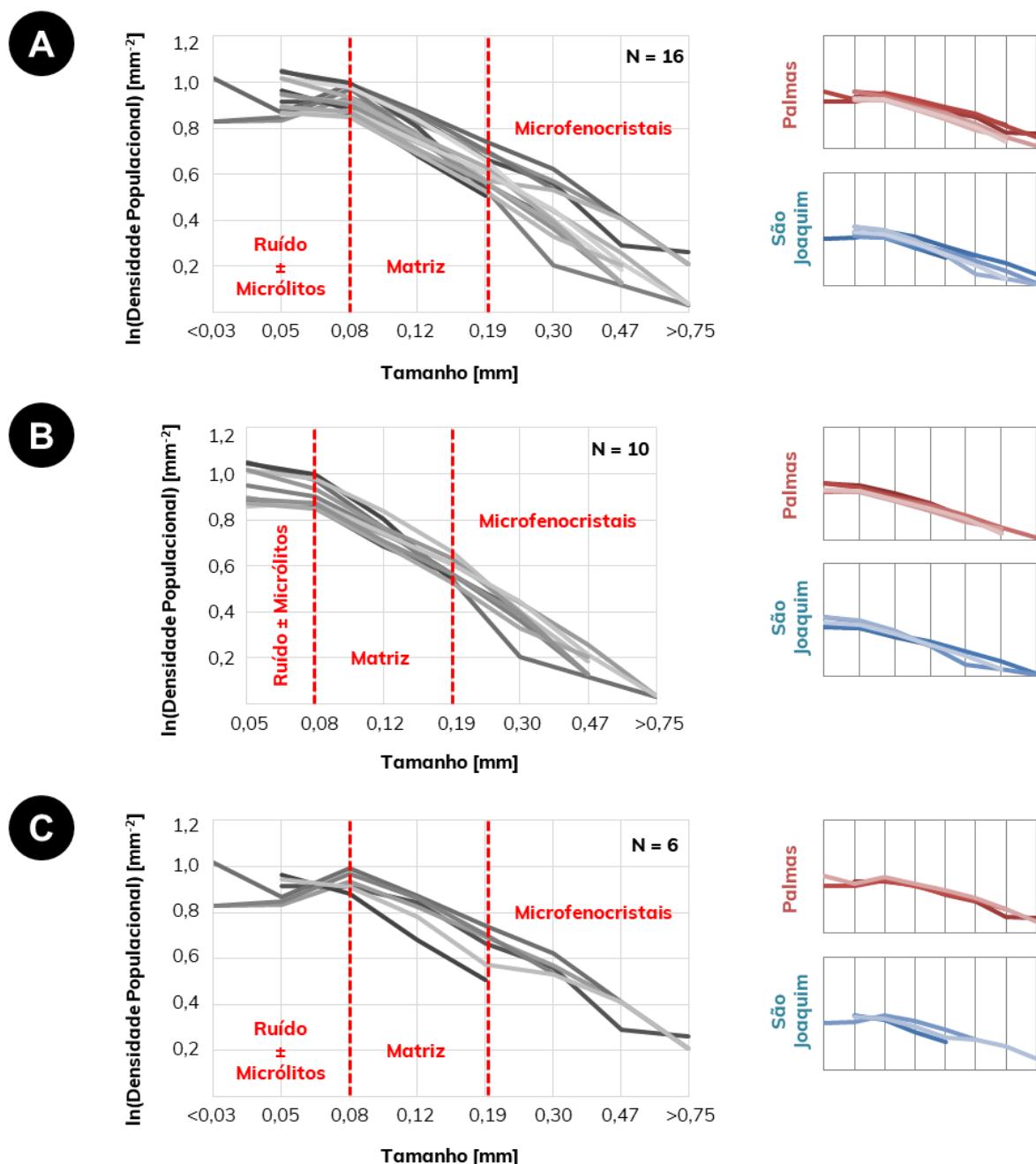


**Figura 4.19** - Fotomicrografias da matriz vítreia e de amígdalas à CL: A) em LC-16-2, da litofácies riolito afanítico do PPA, o bandamento definido ao microscópio luminesce intensamente na faixa mais cristalina; B) em LC-25-1, também da litofácies riolito afanítico do PPA, observa-se luminescência moderada a intensa nos núcleos de desvitrificação (esferulitos e/ou oxidações, cloritizações ou argilizações); C) em SJ-258, da litofácies *pitchstone* amigdaloidal do PSJ, a alta porcentagem de vidro vulcânico permite a observação clara de quebras perlíticas e de micrólitos; D) em SJ-054, da litofácies *pitchstone* maciço do PSJ, o preenchimento multifásico da amígdala descrito ao microscópio óptico é ainda mais claro (1 - celadonita; 2 - calcedônia; 3 - quartzo microcristalino; 4 - zeólita).

### 3.2 CRYSTAL SIZE DISTRIBUTION (CSD)

À técnica de CSD foram submetidas, experimentalmente, 10 fotomicrografias ao microscópio óptico de 10 lâminas petrográficas distintas, 5 de cada área de estudo, além de 6 fotomicrografias à CL também de 6 amostras distintas, 3 de cada área de estudo. No geral, a maioria das 16 curvas obtidas apresentaram duas

inflexões principais: a primeira, a aproximadamente 0,08 mm, corresponde tanto aos micrólitos como também aos ruídos e, portanto, não é analisada; já a segunda, próxima de 0,19 mm, marca a transição de tamanho entre cristais da matriz e microfenocristais (Figura 4.20).



**Figura 4.20** - Curvas CSD para as amostras do PPA e do PSJ: A) curvas CSD totais; B) curvas CSD das fotomicrografias ao microscópio óptico (mais consistentes, porém com menor resolução); C) curvas CSD das fotomicrografias à CL (mais precisas, porém com menor consistência).

Com base nas retas obtidas por regressão linear dos intervalos correspondentes aos microfenocristais e à matriz se determinou os parâmetros

necessários ao cálculo do tempo de residência. Para tanto, a taxa de crescimento ( $G$ ) adotada foi de  $10^{-11}$  mm/s, em consonância com os trabalhos de Luchetti (2015) e Angelini (2018) que já aplicaram o CSD a rochas da PMP e fundamentam esse valor na literatura experimental (Cashman, 1988; Cashman, 1992; Geschwind & Rutherford, 1995; Higgins, 1996; Hammer *et al.*, 1999; Hammer & Rutherford, 2002; Couch, 2003; Larsen, 2005; McCanta *et al.*, 2007; Brugger & Hammer, 2010; Genareau & Clarke, 2010). Os resultados obtidos constam na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3** - Cálculo do tempo de residência (Fases: P - microfenocristal (*phenocryst*); G - matriz (*groundmass*). Variáveis: N - população; S - slope;  $n^0$  - intersecção da reta com o eixo Y;  $R^2$  - coeficiente de determinação;  $\tau$  - tempo de residência;  $CL_{\text{máx}}$  - comprimento característico máximo;  $L_{\text{máx}}$  - média dos quatro maiores cristais da população;  $\tau_{\text{máx}}$  - tempo de residência máximo).

AMOSTRA	N	FASE	S	$n^0$	$R^2$	$\tau$ (-1/GS) [anos]	$CL_{\text{máx}}$ [mm]	$L_{\text{máx}}$ [mm]	$\tau_{\text{máx}}$ (CL/G) [anos]	$\tau_{\text{máx}}$ (L/G) [anos]
<b>CSD APLICADO À FOTOMICROGRAFIAS AO MICROSCÓPIO ÓPTICO</b>										
Platô de Palmas (PPA), PR										
LC-12-3	210	P	-1,5389	0,8480	0,9997	2.061	2,27	2,21	7.198	7.016
		G	-2,4909	1,0248	0,9755	1.273				
LC-16-2	190	P	-1,1079	0,7306	0,9373	2.862	1,45	2,91	4.598	9.235
		G	-2,5915	1,0093	0,9826	1.224				
LC-20-6	251	P	-1,0151	0,7547	0,9584	3.124	1,39	3,39	4.403	10.750
		G	-1,9688	0,9870	0,9436	1.611				
LC-23-1	474	P	-1,7639	0,9447	0,9927	1.798	1,12	2,43	3.551	7.698
		G	-2,8035	1,1361	0,9778	1.131				
LC-29-1	688	P	-1,6511	0,9389	0,9663	1.921	1,68	2,83	5.327	8.974
		G	-2,6130	1,1516	0,9921	1.214				
Platô de São Joaquim (PSJ), SC										
SJ-032	310	P	-1,5290	0,8386	0,9927	2.074	1,34	2,63	4.249	8.324
		G	-2,8318	1,0929	0,9926	1.120				
SJ-055-A	702	P	Indivíduos Insuficientes				1,18	1,40	3.742	4.447
		G	-3,7649	1,2473	0,9906	842				
SJ-066	609	P	-0,7816	0,5549	0,7354	4.057	3,52	2,67	11.162	8.467
		G	-3,7505	1,2310	0,9932	845				
SJ-228-A	241	P	-1,0025	0,7598	0,9808	3.163	1,10	3,36	3.488	10.662
		G	-2,0920	0,9509	0,9939	1.516				
SJ-258	188	P	-0,9054	0,7026	0,9852	3.502	1,55	2,74	4.915	8.673
		G	-2,5180	1,0186	0,9514	1.259				
<b>CSD APLICADO À FOTOMICROGRAFIAS À CL</b>										
Platô de Palmas (PPA), PR										
LC-16-2	86	P	-0,7468	0,7606	0,8267	4.246	2,07	3,35	6.577	10.615
		G	-1,8733	1,0346	0,9393	1.693				
LC-20-6	88	P	-0,9980	0,8747	0,9952	3.177	1,71	3,15	5.408	9.981
		G	-2,1014	1,0839	0,9942	1.509				
LC-29-1	156	P	-0,9618	0,9038	0,9832	3.297	1,21	3,62	3.825	11.463
		G	-2,1686	1,1431	0,9862	1.462				
Platô de São Joaquim (PSJ), SC										
SJ-054	28	P	Indivíduos Insuficientes				0,36	0,85	1.142	2.687
		G	-3,3428	1,1138	0,9832	949				
SJ-105-A	108	P	-1,5413	0,9932	1,0000	2.057	1,42	2,25	4.496	7.127
		G	-2,3403	1,1418	0,9998	1.355				
SJ-250	63	P	-0,6174	0,7144	0,9936	5.136	3,77	4,17	11.955	13.207
		G	-2,7352	1,0939	0,9895	1.159				

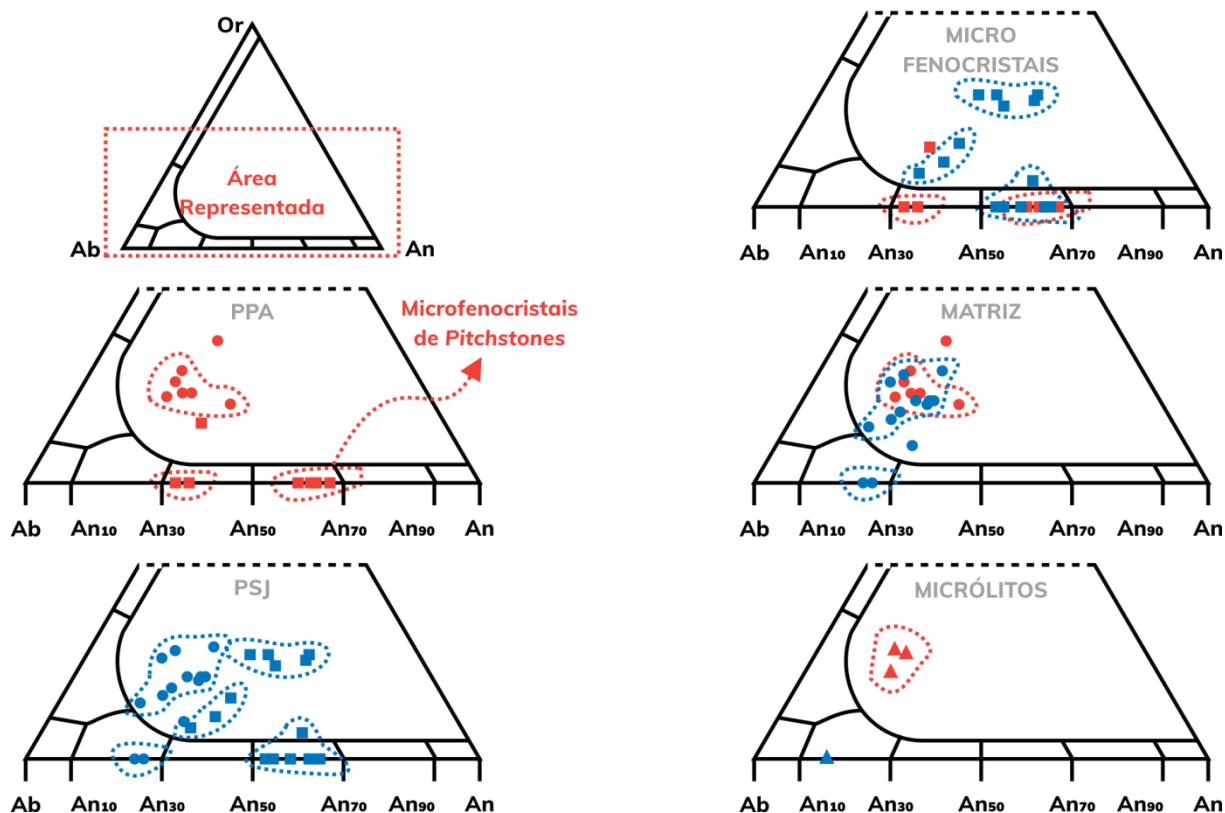
Constata-se que, para os microfenocristais, o tempo de residência é substancialmente mais elevado quando comparado ao calculado para a matriz, de 1.798 a 5.136 anos contra 949 a 1.693 anos da última. Ainda, os maiores valores para a fase microfenocristal são característicos das rochas do PSJ, enquanto as rochas do PPA revelam um maior tempo de residência para os cristais da matriz. Em relação aos tempos de residência máximos, estes variam de 1.142 a 11.955 anos no método do comprimento característico máximo, fornecido pelo *CSD Corrections* 1.60, e de 2.687 a 13.207 anos no método da média dos quatro maiores cristais da população, respectivamente. De qualquer modo, todas essas observações são compatíveis com trabalhos semelhantes e serão exploradas de forma integrada com as informações texturais e geoquímicas no momento oportuno.

### 3.3 QUÍMICA MINERAL SEMIQUANTITATIVA

A análise de EDS em 14 lâminas petrográficas resultou em 47 fotomicrografias e 274 pontos com geoquímica de óxidos semiquantitativa. Desse universo amostral, 9 delas forneceram resultados satisfatórios para a análise geoquímica semiquantitativa das gerações de plagioclásio, totalizando, juntas, 52 pontos. Depois de tratados e aplicados ao cálculo da fórmula estrutural na base de 32 oxigênios (Deer *et al.*, 1993), obtiveram-se os resultados compilados na Tabela 4.4 e nos diagramas ternários da Figura 4.21.

**Tabela 4.4** - Espécies minerais e fórmulas estruturais das gerações de plagioclásio (Fases: P - microfenocristal (*phenocryst*); G - matriz (*groundmass*); M - micrólito).

REGIÃO	FASE	An(%)	ESPÉCIE MINERAL	FÓRMULA ESTRUTURAL
Palmas	P	31~67	Andesina~Labradorita	$(\text{Ca}_{2,0}\text{Na}_{1,9}\text{K}_{0,1})(\text{Fe}_{0,3}\text{Al}_{4,1}\text{Si}_{11,6})\text{O}_{32}$
	G	20~35	Oligoclásio ( $\pm$ Andesina)	$(\text{Ca}_{1,0}\text{Na}_{2,0}\text{K}_{1,0})(\text{Fe}_{0,7}\text{Al}_{2,4}\text{Si}_{12,9})\text{O}_{32}$
	M	17~20	Oligoclásio	$(\text{Ca}_{0,8}\text{Na}_{2,2}\text{K}_{1,0})(\text{Fe}_{0,6}\text{Al}_{2,2}\text{Si}_{13,2})\text{O}_{32}$
São Joaquim	P	32~67	Andesina~Labradorita	$(\text{Ca}_{2,0}\text{Na}_{1,6}\text{K}_{0,4})(\text{Fe}_{0,6}\text{Al}_{4,2}\text{Si}_{11,2})\text{O}_{32}$
	G	17~30	Oligoclásio	$(\text{Ca}_{1,0}\text{Na}_{2,3}\text{K}_{0,7})(\text{Fe}_{0,5}\text{Al}_{2,3}\text{Si}_{13,2})\text{O}_{32}$
	M	16	Oligoclásio	$(\text{Ca}_{0,6}\text{Na}_{3,4})(\text{Al}_{3,8}\text{Si}_{12,2})\text{O}_{32}$

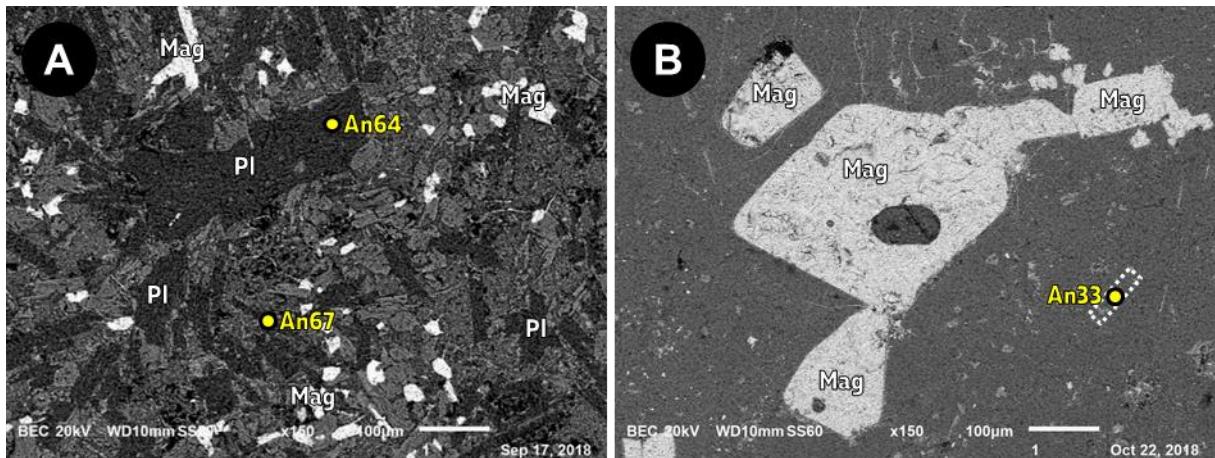


**Figura 4.21** - Diagramas ternários An-Ab-Or para as gerações de plagioclásio. Modificado de Deer et al. (1993).

Os microfenocristais constituem a geração mais cálcea de plagioclásios com teores de anortita variando de 31 a 67%. Essa variação considerável é constatada nas rochas do PPA (Figura 4.22), nas quais a espécie mineral dos *pitchstones* é a labradorita ( $An_{60-67}$ ) e, nas litofácies restantes, a andesina ( $An_{31-36}$ ). Já nas rochas do PSJ, cujo teor de anortita nos microfenocristais varia de 32 a 67%, não é evidente entre as litofácies um contraste na composição destes, por mais que predomine a labradorita (média de  $An_{51}$ ) e os membros mais sódicos se associem à litofácie dacito bandado. A Tabela 4.5 traz a comparação da composição dos microfenocristais por litofácies.

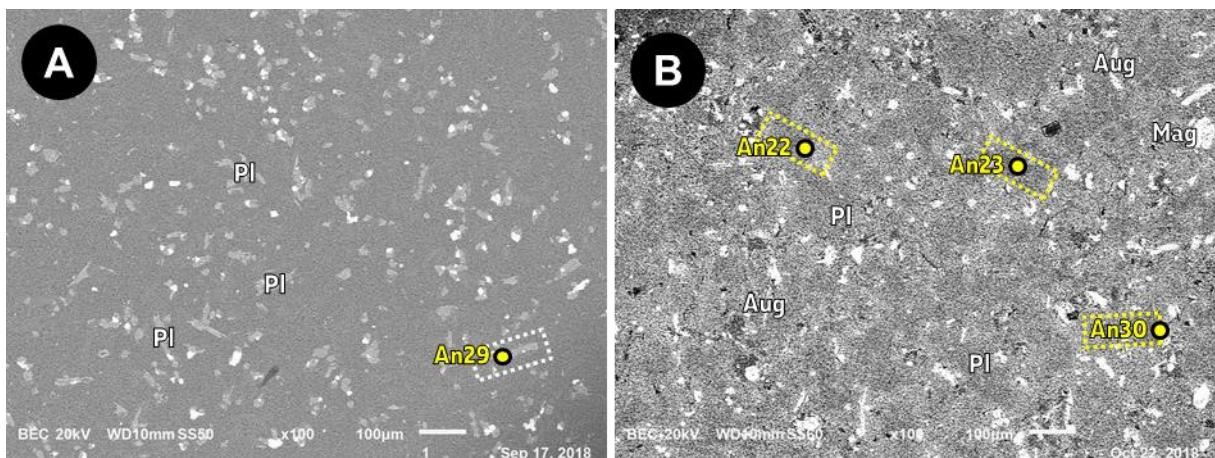
**Tabela 4.5** - Composição dos microfenocristais de plagioclásio por litofácies.

LITOFAÇIES	An(%)	ESPÉCIE MINERAL	FÓRMULA ESTRUTURAL
<b>Plato de Palmas (PPA), PR</b>			
Pitchstone	60~67	Labradorita	$(Ca_{2,5}Na_{1,5})(Fe_{0,1}Al_{5,6}Si_{10,3})O_{32}$
Riolito Afanítico	31~36	Andesina	$(Ca_{1,3}Na_{2,5}K_{0,2})(Fe_{0,5}Al_{2,2}Si_{13,3})O_{32}$
<b>Plato de São Joaquim (PSJ), SC</b>			
Dacito Bandado	32~66	+ Andesina	$(Ca_{1,8}Na_{1,9}K_{0,3})(Fe_{1,2}Al_{3,8}Si_{11,0})O_{32}$
Dacito com Geodos	36~60	+ Andesina	$(Ca_{2,0}Na_{1,4}K_{0,6})(Fe_{0,7}Al_{3,6}Si_{11,7})O_{32}$
Dacito Maciço	52~67	Labradorita	$(Ca_{2,2}Na_{1,7}K_{0,1})(Fe_{0,1}Al_{5,1}Si_{10,8})O_{32}$
Pitchstone Maciço	35~64	+ Labradorita	$(Ca_{2,0}Na_{1,4}K_{0,6})(Fe_{0,5}Al_{4,2}Si_{11,3})O_{32}$



**Figura 4.22** - Fotomicrografias de microfenocristais de plagioclásio ao EDS: A) em LC-29-1, da litofácie *pitchstone* do PPA, os microfenocristais de labradorita se destacam pela tonalidade escura; B) em LC-16-2, da litofácie *riolito afanítico* do PPA, os microfenocristais de andesina se fundem à matriz e são de difícil identificação.

Os plagioclásios da matriz são a geração intermediária em termos composticionais com teores de anortita variando de 17 a 35% (Tabela 4.6). Novamente, essa variação é verificada entre as litofácies do PPA, visto que a espécie mineral de um dos *pitchstones* é a andesina ( $An_{35}$ ) e, nas restantes, o oligoclásio ( $An_{20-25}$ ). Já as rochas do PSJ têm sua matriz constituída essencialmente por oligoclásio ( $An_{17-29}$ ) (Figura 4.23) e, mais uma vez, as composições mais sódicas associam-se com uma amostra da litofácie dacito bandado.



**Figura 4.23** - Fotomicrografias de plagioclásios da matriz ao EDS: A) em SJ-054, da litofácie *pitchstone* maciço do PSJ, o oligoclásio se destaca da matriz vítreia; B) em SJ-250, da litofácie *dacito bandado* do PSJ, o oligoclásio consiste em variações mais escuras da matriz, da qual se destacam cristais tabulares a aciculares de augita e magnetita anédrica.

**Tabela 4.6** - Composição dos plagioclásios da matriz por litofácies.

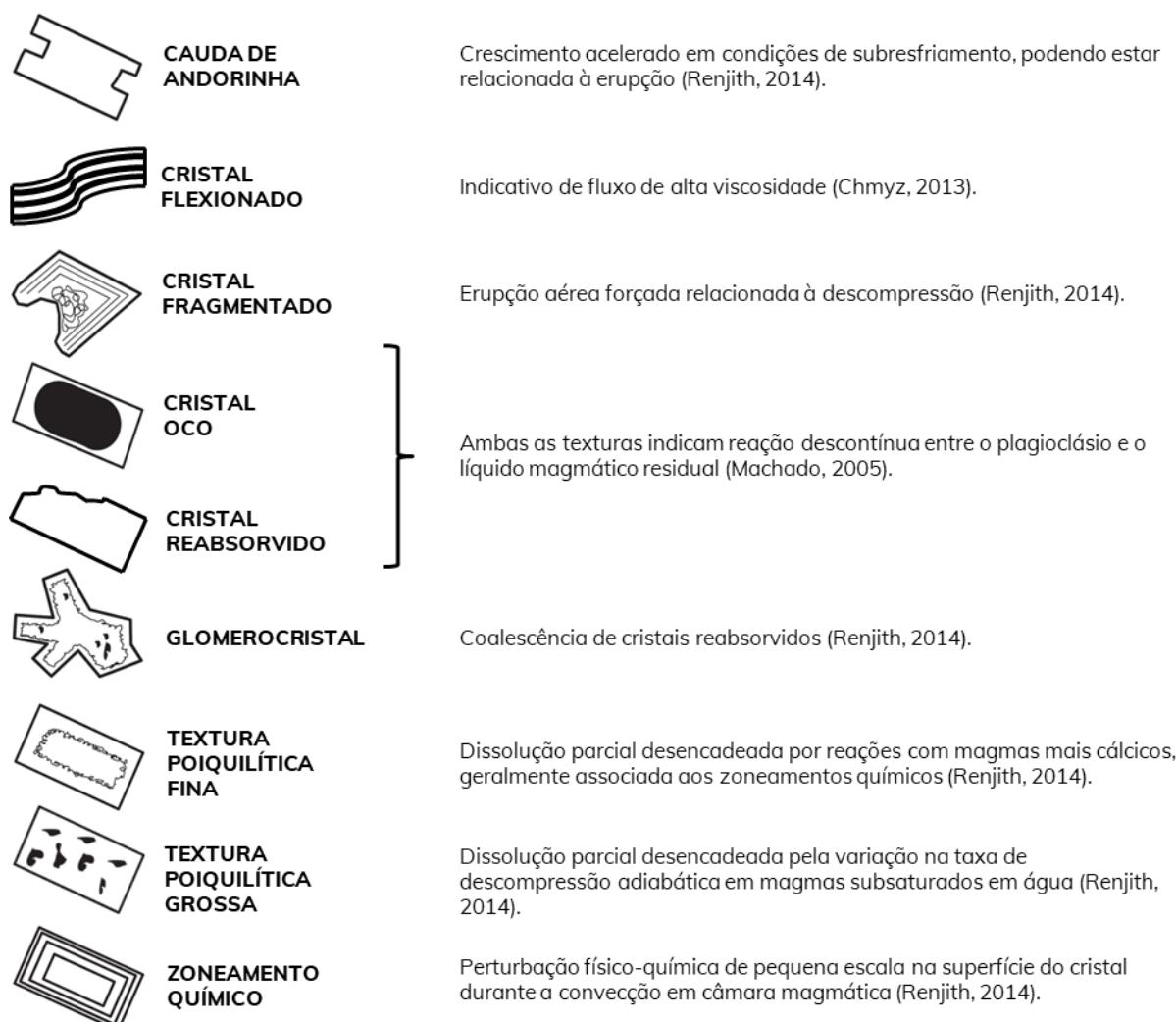
LITOFAÇIES	An(%)	ESPÉCIE MINERAL	FÓRMULA ESTRUTURAL
<b>Platô de Palmas (PPA), PR</b>			
Pitchstone	20~35	+Oligoclásio	(Ca <sub>1,0</sub> Na <sub>2,0</sub> K <sub>1,0</sub> )(Fe <sub>1,7</sub> Al <sub>2,3</sub> Si <sub>12,0</sub> )O <sub>32</sub>
Riolito Afanítico	20~25	Oligoclásio	(Ca <sub>0,9</sub> Na <sub>1,9</sub> K <sub>1,2</sub> )(Al <sub>2,5</sub> Si <sub>13,5</sub> )O <sub>32</sub>
<b>Platô de São Joaquim (PSJ), SC</b>			
Dacito Bandado	17~30	Oligoclásio	(Ca <sub>0,9</sub> Na <sub>2,4</sub> K <sub>0,7</sub> )(Fe <sub>0,5</sub> Al <sub>2,1</sub> Si <sub>13,4</sub> )O <sub>32</sub>
Dacito Maciço	27	Oligoclásio	(Ca <sub>1,1</sub> Na <sub>1,7</sub> K <sub>1,2</sub> )(Al <sub>3,9</sub> Si <sub>12,1</sub> )O <sub>32</sub>
Pitchstone Maciço	29	Oligoclásio	(Ca <sub>1,2</sub> Na <sub>2,0</sub> K <sub>0,8</sub> )(Al <sub>3,0</sub> Si <sub>13,0</sub> )O <sub>32</sub>

Por fim, os micrólitos representam os plagioclásios mais sódicos com teor de anortita variando de 16 a 20% e fórmula estrutural média (Ca<sub>0,7</sub>Na<sub>2,5</sub>K<sub>0,8</sub>)(Fe<sub>0,5</sub>Al<sub>2,6</sub>Si<sub>12,9</sub>)O<sub>32</sub>. Ao EDS foram observados apenas nas amostras LC-25-1, da litofácie riolito afanítico do PPA, e SJ-250, da litofácie dacito bandado de PSJ (esta litofácie que, nas fases microfenocristal e matriz, também se associou a termos sódicos).

## 5 DISCUSSÕES

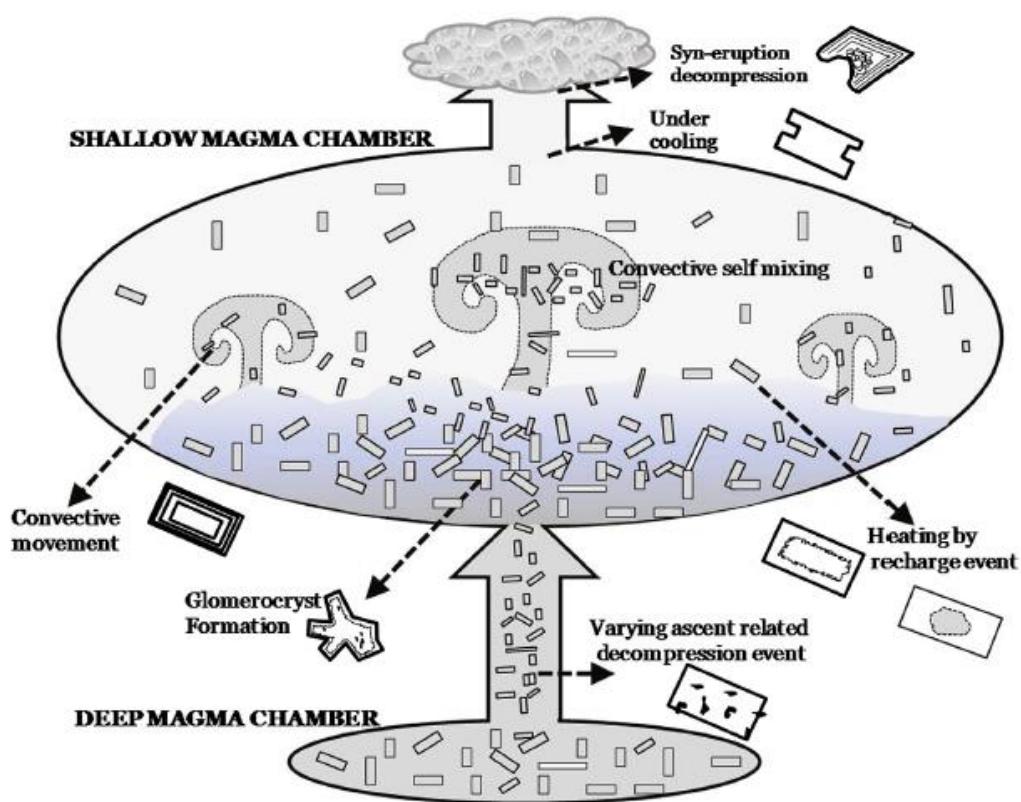
A considerável quantidade de informações obtidas na análise morfológica, textural e geoquímica integrada das gerações de plagioclásio das sequências vulcânicas ácidas do PPA e do PSJ permitem, neste primeiro momento, uma série de inferências acerca da evolução e colocação dessas rochas no contexto da PMP.

A fase microfenocristal, de longe a mais bem caracterizada, consiste, em termos compostionais, em espécimes de andesina que, em algumas rochas, podem alcançar a labradorita, diagnóstico petrográfico confirmado pela geoquímica mineral semiquantitativa. Em termos texturais, os microfenocristais exibem uma série de feições indicativas da dinâmica e evolução da câmara magmática. A Figura 5.1 traz uma compilação das principais texturas observadas e seus significados petrogenéticos.



**Figura 5.1** - Texturas em plagioclásio e seus indicativos petrogenéticos. Modificado de Renjith (2014).

Aos microfenocristais de plagioclásio se associam todas as texturas descritas, exceto o cristal oco, característico da matriz. Contextualizando-as à dinâmica de uma câmara magmática (Figura 5.2), a textura poiquilitica grossa refletiria processos de dissolução desencadeados pela migração do magma de câmaras profundas para reservatórios mais rasos. Uma vez transportadas, essas fases minerais estão sujeitas a uma série de reações com o material da nova câmara até o equilíbrio químico ser restaurado. Nesse meio tempo, os cristais estão sujeitos à reabsorção e, portanto, à formação de glomerocristais, além da ação de correntes convectivas que ocasionalmente podem levar ao desenvolvimento de zoneamentos químicos. Na eventual injeção de mais magma ao reservatório, o aquecimento e o desequilíbrio químico decorrente são capazes de gerar a textura poiquilitica fina, observada ao microscópio óptico em associação a zoneamentos químicos. A níveis mais rasos ou em momentos precedentes à erupção, condições de subresfriamento proporcionam a formação das terminações em cauda de andorinha e, por fim, ao extravasamento do magma podem se associar os cristais fragmentados e/ou os cristais flexionados, se houver fluxo.



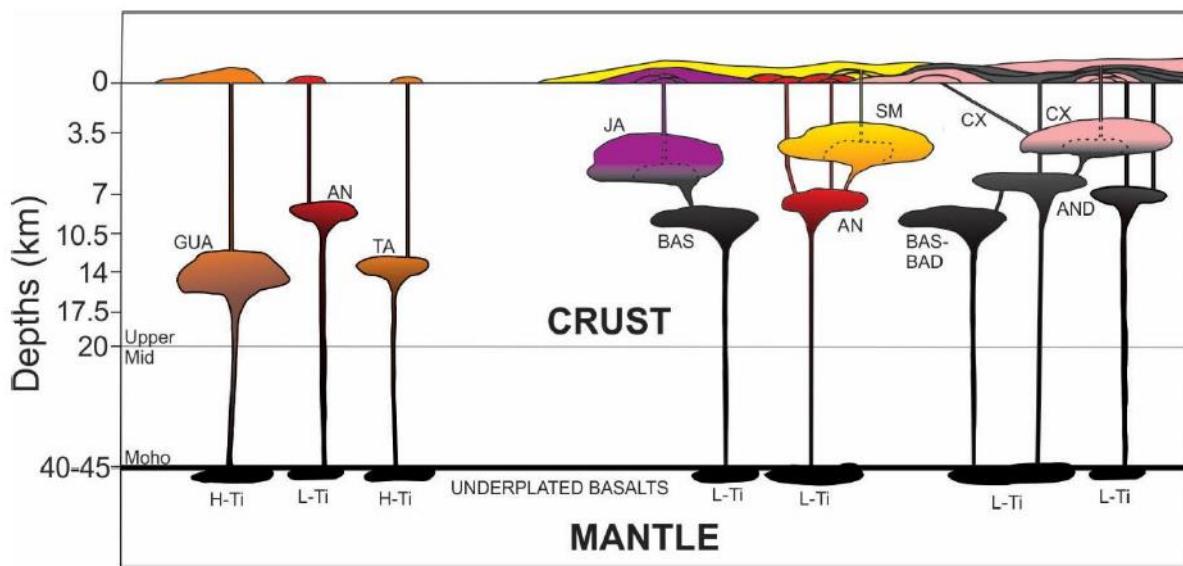
**Figura 5.2** - Representação esquemática de processos magmáticos e texturas resultantes. Modificado de Renjith (2014).

A tudo isso se soma os resultados da técnica de CSD, a qual estabelece um tempo de residência médio próximo dos 3.000 anos para a fase microfenocristal com máximo variando de 7.000 a 10.000 anos. Esses valores são compatíveis aos obtidos por Luchetti (2015) para rochas ATP e ATC e contrastam com o tempo de residência médio calculado de, em média, 1.200 anos para cristais da fase matriz.

Os cristais de plagioclásio que integram a matriz contrastam, além do tamanho (inferior a um décimo de milímetro), em composição e texturas quando comparados aos microfenocristais. A matriz é composta essencialmente por oligoclásio com teor de anortita variando de 20 a 29% para observações petrográficas e de 17 a 30% para observações ao EDS. Aqui, predominam texturas de resfriamento em contrapartida às texturas de evolução em câmara magmática. São comuns as terminações em cauda de andorinha e, subordinadamente, os cristais ocos e reabsorvidos. Portanto, quando são levados em conta os tempos de residência obtidos através das curvas CSD, é natural que os microfenocristais exibam uma maior variedade textural, visto que os cristais da matriz não residem muito mais que 1.000 anos no sistema magmático. Na literatura, os trabalhos de Nardy *et al.* (1993) e Machado (2005) corroboram as observações texturais para os microfenocristais ao descreverem plagioclásio com bordas corroídas que evidenciariam processos de absorção pelo líquido magmático que originou a matriz.

A fase micrólito, por fim, está intimamente relacionada às condições de subresfriamento e resfriamento rápido que antecederam e sucederam o extravasamento das lavas riolíticas e dacíticas no PPA e no PSJ, respectivamente. Nas curvas CSD são representados pela alta densidade populacional que precede a primeira inflexão, anterior à matriz. Porém, como a eles se somaram artefatos recorrentes da resolução das fotomicrografias, não foi possível o cálculo do tempo de residência, por mais que Jerram & Martin (2008) afirmem que não passe da ordem de horas ou dias.

Considerando a possibilidade de que cada uma dessas gerações de plagioclásio reflita diferentes estágios no desenvolvimento do magma e das rochas às quais se associam, o conceito de evolução apresentado principalmente para a fase microfenocristal se aproxima, em partes, à proposta de Luchetti (2015) para a origem e alimentação dos derrames ácidos da PMP exposta na Figura 5.3 e baseada em extensos estudos termo- e barométricos em plagioclásio e piroxênio de rochas ATP (às quais pertecem o PPA e o PSJ) e ATC.



**Figura 5.3 - Ilustração esquemática do sistema de alimentação dos derrames ácidos da PMP.** Fonte: Luchetti (2015).

Por fim, uma última observação pertinente aos resultados obtidos diz respeito às litofácies *pitchstone*, tanto do PPA como do PSJ. Sob a análise de CL monocromática, estas foram as únicas amostras nas quais o plagioclásio luminesceu moderada a intensamente. Na química mineral semiquantitativa, coincidentemente, as gerações de plagioclásio associadas sempre se mostraram relativamente mais cálcicas quando comparadas às demais, principalmente nos *pitchstones* do PPA. Em alguns pontos, o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  excede os padrões observados. Portanto, a luminescência pode estar associada ao  $\text{Fe}^{3+}$  anômalo assim como, para as rochas do PPA, aos altos teores de Rb e Sr nessa litofácie, além é, claro, de possíveis defeitos estruturais.

## 6 CONCLUSÕES

- As rochas hipohialinas do PPA e do PSJ são constituídas por microfenocristais de plagioclásio, sanidina e, subordinadamente, augita e minerais opacos. Na matriz ocorre plagioclásio, sanidina, quartzo, augita e minerais opacos. A matriz hipohialina, composta predominantemente por vidro vulcânico em porcentagens que variam de 45 a 60%, associa-se a micrólitos de plagioclásio e de augita. Predominam as estruturas de fluxo com ocorrência subordinada de amígdalas e veios/vênulas;
- Os microfenocristais de plagioclásio têm granulação muito fina a fina, variando de 0,2 a 0,8 mm, e teor de anortita que vai de 31 a 67% com predomínio da andesina. Predominam texturas relacionadas à evolução em câmara magmática como cristais reabsorvidos, texturas poiquilíticas finas e grossas, glomerocristais, cristais flexionados, zoneamentos químicos, cristais fragmentados e caudas de andorinha desenvolvidas em um tempo de residência médio da ordem de 3.000 anos com máximo em 10.000 anos;
- O plagioclásio da matriz tem granulação muito fina, variando de 0,06 a 0,15 mm, e teor de anortita que vai de 17 a 30% com predomínio do oligoclásio. Predominam texturas características de resfriamento rápido como caudas de andorinha e cristais ocos desenvolvidas em um tempo de residência médio da ordem de 1.000 anos;
- Os micrólitos de plagioclásio têm granulação muito fina e teor de anortita variando de 17 a 20%. O hábito acicular retilíneo a curvilíneo e a associação ao vidro vulcânico são diagnósticos a estes cristais derivados do resfriamento rápido;
- Cada geração de plagioclásio corresponde a diferentes estágios de evolução do magma parental e refletem processos físico-químicos que ocorrem desde o reservatório magmático profundo até a câmara magmática rasa (microfenocristais) e dela até a erupção (matriz e micrólitos);
- Os *pitchstones* do PPA e do PSJ constituem rochas de comportamento geoquímico anômalo evidenciado pela resposta positiva à CL (relacionada a defeitos estruturais ou elementos traço) e pelos microfenocristais e matriz relativamente mais cálcicos e com maior teor de Fe incorporado à estrutura.

## REFERÊNCIAS

- ANDREWS, B. J.; GARDNER, J. E.; HOUSH, T. B. (2008). Repeated Recharge, Assimilation, and Hybridization in Magmas Erupted from El Chichón as Recorded by Plagioclase and Amphibole Phenocrysts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175:415-426.
- ANGELINI, P. G. (2018). *Petrological and Volcanological Insights into Acid Lavas from the Paraná-Etendeka Magmatic Province on the Surroundings of Guarapuava City, Paraná, Southern Brazil: A Contribution of Detailed Textural Characterization Combined with In Situ Sr Isotopes in Plagioclase Phenocrysts* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ARIOLI, E. E.; LICHT, O. A. B. (2013). *O Grupo Serra Geral no Estado do Paraná: Mapeamento Geológico das Cartas 1:250.000 de Guaira, Cascavel, Campo Mourão, Foz do Iguaçu, Guaraniuaçu, Guarapuava, Pato Branco e Clevelândia*. Curitiba: MINEROPAR - Serviço Geológico do Paraná.
- BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MARQUES, L. S.; MELFI, A. J.; NARDY, A. J. R.; PAPATRECHAS, C.; PICCIRILLO, E. M.; ROISENBERG, A. (1986). Petrogenetic Aspects of Acid and Basaltic Lavas from the Paraná Plateau (Brazil): Geological, Mineralogical and Petrochemical Relationships. *Journal of Petrology*, 27:915-944.
- BELLIENI, G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MARQUES, L. S.; MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E. M.; NARDY, A. J. R.; ROISENBERG, A. (1984). High- and Low-Ti Flood Basalts from the Paraná Plateau (Brazil): Petrology and Geochemical Aspects Bearing on their Mantle Origin. *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlung*, 150:273-306.
- BESSER, M. L. (2017). *Sequência Vulcânica Ácida da Região de São Joaquim-SC: Reoignimbros ou Lavas?* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- BORGES, M. R.; SEM, G.; HART, G. L.; WOLFF, J. A.; CHANDRASEKHARAM, D. (2014). Plagioclase as Recorder of Magma Chamber Processes in the Deccan Traps: Sr-Isotope Zoning and Implications for Deccan Eruptive Event. *Journal of Asian Earth Sciences*, 84:95-101.
- BRUGGER, C. R.; HAMMER, J. E. (2010). Crystal Size Distribution Analysis of Plagioclase in Experimentally Decompressed Hydrous Rhyodacite Magma. *Earth and Planetary Science Letters*, 300(3-4):246-254.
- CAO, M.; QIN, K.; LI, G.; YANG, Y.; EVANS, N. J.; ZHANG, R.; JIN, L. (2014). Magmatic Processes Recorded in Plagioclase at the Baogutu Reduced Porphyry Cu Deposit, Western Junggar, NW-China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 82:136-150.
- CASHMAN, K. V. (1988). Crystallization of Mount St. Helens 1980-1986 Dacite: A Quantitative Textural Approach. *Bulletin of Volcanology*, 50:194-209.

- CASHMAN, K. V. (1992). Groundmass Crystallization of Mount St. Helens Dacite, 1980-1986: A Tool for Interpreting Shallow Magmatic Processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*: 109(4):431-449.
- CHMYZ, L. (2013). *Aspectos Vulcanogênicos das Rochas Ácidas do Tipo Palmas da Província Magmática do Paraná Aflorantes no Sudoeste Paranaense* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- COOTE, A. C.; SHANE, P. (2016). Crystal Origins and Magmatic System beneath Ngauruhoe Volcano (New Zealand) Revealed by Plagioclase Textures and Compositions. *Lithos*, 260:107-119.
- COUCH, S. (2003). The Kinetics of Degassing-Induced Crystallization at Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Journal of Petrology*, 44(8):1477-1502.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. (2007). *Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e Preparação de Amostras - Materiais Poliméricos, Metálicos e Semicondutores*. Porto Alegre: EDIPUCRS.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. (1993). *Minerais Constituintes das Rochas: Uma Introdução*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- FREITAS, V. A. (2009). *A Geração de Magmas Ácidos na Província Magmática do Paraná, Região de Piraju-Ourinhos (SP): Uma Contribuição da Geoquímica Isotópica e de Elementos Traço em Rochas e Minerais* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GENAREAU, K.; CLARKE, A. B. (2010). In Situ Measurements of Plagioclase Growth Using SIMS Depth Profiles of  $^{7}\text{Li}/^{30}\text{Si}$ : A Means to Acquire Crystallization Rates During Short-Duration Decompressing Events. *American Mineralogist*, 95(4):592-601.
- GESCHWIND, C. H.; RUTHERFORD, M. J. (1995). Crystallization of Microlites During Magma Ascent: The Fluid Mechanics of 1980-1986 Eruptions at Mount St. Helens. *Bulletin of Volcanology*, 57(5):356-370.
- GILL, R. (2014). *Rochas e Processos Ígneos: Um Guia Prático*. Porto Alegre: Bookman.
- GÖTZE, J.; KRBETSCHEK, M. R.; HABERMANN, D.; WOLF, D. (2010). High-Resolution Cathodoluminescence Studies of Feldspar Minerals. In: PAGEL, M.; BARBIN, V.; PLANC, P.; OHNENSTETTER, D. *Cathodoluminescence in Geosciences* (pp. 245-270). Heidelberg: Springer-Verlag.
- GUCSIK, A. (2009). *Cathodoluminescence and Its Application in the Planetary Sciences*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- HAMMER, J. E.; CASHMAN, K. V.; HOBLITT, R. P.; NEWMAN, S. (1999). Degassing and Microlite Crystallization During Pre-Climactic Events of the 1991 Eruption of Mt. Pinatubo, Philippines. *Bulletin of Volcanology*, 60(5):355-380.

- HAMMER, J. E.; RUTHERFORD, M. J. (2002). An Experimental Study of the Kinetics of Decompression-Induced Crystallization in Silicic Melt. *Journal of Geophysical Research*, 107:1-24.
- HIGGINS, M. D. (1996). Magma Dynamics beneath Kameni Volcano, Thera, Greece, as Revealed by Crystal Size and Shape Measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70:37-48.
- HIGGINS, M. D. (2000). Measurement of Crystal Size Distributions. *American Mineralogist*, 85:1105-1116.
- HIGGINS, M. D. (2017). Quantitative Investigation of Felsic Rock Textures Using Cathodoluminescence Images and Other Techniques. *Lithos*, 277:259-268.
- JANASI, V. A.; FREITAS, V. A.; SIMONETTI, A.; HEAMAN, L. M.; MARTINS, L. (2010). Trace-Element and Sr Isotope Microanalyses of Plagioclase Phenocrysts and Groundmass: Implications for Petrogenesis of the Paraná-Etendeka Dacites, Brazil. *AGU Meetings of the Americas*, Foz do Iguaçu.
- JERRAM, D. A.; MARTIN, V. M. (2008). Understanding Crystal Populations and Their Significance through the Magma Plumbing System. In: ANNEN, C.; ZELLMER, G. F. *Dynamics of Crustal Magma Transfer, Storage and Differentiation* (pp. 133-148). Londres: The Geological Society of London.
- LARSEN, J. F. (2005). Experimental Study of Plagioclase Rim Growth Around Anorthite Seed Crystals in Rhyodacitic Melt. *American Mineralogist*, 90:417-427.
- LICHT, O. A. B. (2018). A Revised Chemo-Chrono-Stratigraphic 4-D Model for the Extrusive Rocks of the Paraná Igneous Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 355:32-54.
- LICHT, O. A. B.; LIMA, E. F. D. (2014). A Associação dos Gaps de Si-Zr-Ti-P na Subdivisão das Rochas da Província Ígnea do Paraná. *47º Congresso Brasileiro de Geologia*, Porto Alegre.
- LUCHETTI, A. C. F. (2015). *Vulcanologia e Petrologia das Rochas Vulcânicas Ácidas da Província Magmática do Paraná* (Tese de Doutorado). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- MACHADO, F. B. (2005). *Geologia e Aspectos Petrológicos das Rochas Intrusivas e Efusivas Mesozóicas de Parte da Borda Leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo* (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- MARSH, B. D. (1988). Crystal Size Distribution (CSD) in Rocks and the Kinetics and Dynamics of Crystallization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99(3):277-291.
- MCCANTA, M. C.; RUTHERFORD, M. J.; HAMMER, J. E. (2007). Pre-Eruptive and Syn-Eruptive Conditions in Black Butte, California Dacite: Insight into Crystallization

Kinetics in a Silicic Magma System. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160(3-4):263-284.

MCPHIE, J.; DOYLE, M.; ALLEN, R. L. (1993). *Volcanic Textures: A Guide to the Interpretation of Textures in Volcanic Rocks*. Hobart: University of Tasmania, Centre for Ore Deposit and Exploration Studies.

MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E. M.; NARDY, A. J. R. (1988). Geological and Magmatic Aspects of the Paraná Basin - An Introduction. In: PICCIRILLO, E. M.; MELFI, A. J. *Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects* (pp. 1-14). São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. (2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2):265-297.

MISUZAKI, A. M. P.; THOMAZ FILHO, A. (2004). O Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil. In: MANESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; DAL RÉ CARNEIRO, C.; BRITO-NEVES, B. B. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (pp. 281-291). São Paulo: Beca.

NARDY, A. J. R.; MACHADO, F. B.; OLIVEIRA, M. A. F. (2008). As Rochas Vulcânicas Mesozóicas Ácidas da Bacia do Paraná: Litoestratigrafia e Considerações Geoquímico-Estratigráficas. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(1):178-195.

NARDY, A. J. R.; OLIVEIRA, M. A. F.; BETANCOURT, R. H. S.; VERDUGO, D. R. H.; MACHADO, F. B. (2002). Geologia e Estratigrafia da Formação Serra Geral. *Revista Geociências UNESP*, 21:15-32.

NARDY, A.J.R.; PICCIRILLO E.M.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MELFI, A. J.; BELLINI, G.; OLIVEIRA, M.A.F. (1993). Caracterização Litogeоquímica e aspectos Petrológicos de Rochas Vulcânicas da Formação Serra Geral: Região Centro-Sul, do Estado do Paraná. *Revista Geociências UNESP*, 12(2):275-313.

PAGEL, M.; BARBIN, V.; PLANC, P.; OHNENSTETTER, D. (2010). Cathodoluminescence in Geosciences: An Introduction. In: PAGEL, M.; BARBIN, V.; PLANC, P.; OHNENSTETTER, D. *Cathodoluminescence in Geosciences* (pp. 245-270). Heidelberg: Springer-Verlag.

PAMUCKU, A. S.; GUALDA, G. A. R.; ANDERSON JR, A. T. (2012). Crystallization Stages of the Bishop Tuff Magma Body Recorded in Crystal Textures in Pumice Clasts. *Journal of Petrology*, 53(3):589-609.

PEATE, D. W. (1989). *Stratigraphy and Petrogenesis of the Paraná Continental Flood Basalts, Southern Brazil* (Tese de Doutorado). The Open University, Milton Keynes.

- PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. (1992). Chemical Stratigraphy of the Paraná Lavas (South America): Classification of Magma Types and their Distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55:119-13.
- POLO, L. A. (2014). *O Vulcanismo Ácido da Província Magmática Paraná-Etendeka na Região de Gramado Xavier, RS: Estratigrafia, Estruturas, Petrogênese e Modelo Eruptivo* (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- RANDOLPH, A. D.; LARSON, M. A. (1971). *Theory of Particulate Processes: Analysis and Techniques of Continuous Crystallization*. New York: Academic Press, INC.
- RASBAND, W. S. (2010). *ImageJ*. Bethesda: United States National Institute of Health.
- REED, R. J. B. (2005). *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. New York: Cambridge University Press.
- RENJITH, M. L. (2014). Micro-Textures in Plagioclase from 1994-1995 Eruption, Barren Island Volcano: Evidence of Dynamic Magma Plumbing System in the Andaman Subduction Zone. *Geoscience Frontiers*, 5:113-126.
- SANO, K.; TORAMARU, A. (2017). Cooling and Crystallization of Rhyolite-Obsidian Lava: Insights from Micro-Scale Projections on Plagioclase Microlites. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 341:158-171.
- SANTO, A. P. (2005). Magmatic Evolution Processes as Recorded in Plagioclase Phenocrysts of Nea Kameni Rocks (Santorini Volcano, Greece). In: FYTIKAS, M.; VOUGIOUKALAKIS, G. *The South Aegean Active Volcanic Arc* (pp. 139-160). Amsterdã: Elsevier.
- SEVERIN, K. P. (2005). *Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- SHANE, P. (2015). Contrasting Plagioclase Textures and Geochemistry in Response to Magma Dynamics in an Intra-Caldera Rhyolite System, Okataina Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 297:1-10.
- SILVA, T. G. (2014). *Síntese, Caracterização Estrutural e Óptica de Filmes de CeO<sub>2</sub> Obtidos por Pirólise de Sais de Cério* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SIMÕES, M. S. (2018). *Litofácies, Fábrica Magnética e Geoquímica de Condutos Alimentadores e Lavas Ácidas do Grupo Serra Geral no Nordeste do Rio Grande do Sul* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- STRECKEISEN, A. L. (1967). Classification and Nomenclature of Igneous Rocks: Final Report of an Inquiry. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 107:144-240.

- USTUNISIK, G.; KILINC, A.; NIELSEN, R. L. (2014). New Insights into the Processes Controlling Compositional Zoning in Plagioclase. *Lithos*, 200-201:80-93.
- VICCARO, M.; BARCA, D.; BOHRSON, W. A.; D'ORIANO, C.; GIUFFRIDA, M.; NICOTRA, E.; PITCHER, B. W. (2016). Crystal Residence Times from Trace Element Zoning in Plagioclase Reveal Changes in Magma Transfer Dynamics at Mt. Etna During the Last 400 Years. *Lithos*, 248-251:309-323.
- VIEIRA, N. M. M. (2017). *Petrologia e Aspectos Geoquímicos das Rochas Vulcânicas Ácidas Tipo Palmas e Chapecó da Província Magmática do Paraná* (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- VLACH, S. R. F. (2002). A Classe dos Tectossilicatos: Guia Geral da Teoria e Exercício. *Geologia USP Série Didática*, 1:1-49.
- WERNICK, E. (2004). *Rochas Magmáticas: Conceitos Fundamentais e Classificação Modal, Química, Termodinâmica e Tectônica*. São Paulo: Editora UNESP.

## APÊNDICES

### APÊNDICE 1 - TABELAS DE COORDENADAS DOS PONTOS DESCritos

---

#### PLATÔ DE PALMAS (PPA), PR SAD-69 (22S)

PONTO	AMOSTRAS	LITOFAZIES	X	Y	Z
LC-01	LC-01-6	Riolito Maciço	388.789	7.116.456	1.007
LC-11	LC-11-4	Riolito com Disjunções em Laje	436.298	7.059.686	1.300
LC-12	LC-12-2	<i>Pitchstone</i>	434.206	7.063.391	1.299
	LC-12-3	<i>Pitchstone</i>			
LC-15	LC-15-1A	Riolito com Disjunções em Laje	433.284	7.066.724	1.253
LC-16	LC-16-2	Riolito Afanítico	433.349	7.067.017	1.254
	LC-16-3	Riolito com Disjunções em Laje			
LC-20	LC-20-6	<i>Pitchstone</i>	433.080	7.070.917	1.257
LC-23	LC-23-1	Riolito Afanítico	428.972	7.078.684	1.224
LC-25	LC-25-1	Riolito Afanítico	432.869	7.083.312	1.089
LC-28	LC-28-1	Riolito com Disjunções em Laje	435.200	7.082.261	1.198
LC-29	LC-29-1	<i>Pitchstone</i>	432.747	7.086.213	1.136

---

#### PLATÔ DE SÃO JOAQUIM (PSJ), SC WGS-84 (22S)

PONTO	AMOSTRAS	LITOFAZIES	X	Y	Z
SJ-015	SJ-015-A1	Dacito Maciço	602.955	6.871.101	1.382
SJ-032	SJ-032	Dacito Hialino com Geodos	601.777	6.864.509	1.287
SJ-054	SJ-054	<i>Pitchstone</i> Maciço	587.302	6.859.430	1.180
SJ-055	SJ-055-A	<i>Pitchstone</i> Maciço	589.530	6.858.173	1.777
SJ-066	SJ-066	Dacito Litoidal/Vítreo Amigdaloidal	603.298	6.862.447	1.380
SJ-083	SJ-083	Dacito Bandado	579.271	6.867.142	1.124
SJ-105	SJ-105-A	Dacito Bandado	606.090	6.872.227	1.445
SJ-228	SJ-228-A	<i>Pitchstone</i> Maciço	606.132	6.872.283	1.458
SJ-250	SJ-250	Dacito Bandado	594.582	6.856.941	1.223
SJ-258	SJ-258	<i>Pitchstone</i> Amigdaloidal	601.200	6.862.859	1.290